

Zeitrafferversuche an Beton in Deponiesickerwasser und
Lebensdauerprognose für Betonbauteile in der
Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben
August 1993

Bericht erstattet von:

Dipl. Min. F. Schmidt
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann

Gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	2
2.	Einleitung	3
3.	Charakterisierung der korrosiven Medien in Hinblick auf den Baustoff Beton	4
4.	Für die Versuche verwendete Flüssigkeiten	6
5.	Herstellung von Probekörpern	9
5.1.	Verwendeter Beton	9
5.2.	Frisch- und Festbetonkennwerte	10
5.3.	Probenpräparation	11
6.	Zusätzliche Untersuchungen am unkorrodierten Beton	12
7.	Zeitraffende Korrosionsversuche	13
7.1.	Drucklose Beaufschlagung	15
7.2.	Druckbeaufschlagung	15
7.3.	Präparation der Proben nach dem Beaufschlagen	16
8.	Untersuchungsergebnisse	17
8.1.	Makroskopische Veränderungen der Proben	17
8.2.	Änderungen des Phasenbestandes	19
8.2.1.	Untersuchungen mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie	19
8.2.2.	Untersuchungen mit dem Verfahren der Differential-thermoanalyse/gravimetrie	22

8.3.	Untersuchungen der Porenradienverteilung	26
8.4.	Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion	27
8.5.	Chemische Analysen	30
8.6.	Axiale Zugfestigkeit der korrodierten Proben	33
8.7.	Veränderungen der Sauerstoffpermeabilität	35
9.	Diskussion	37
10.	Literatur	43
11.	Anhang	45

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im Zusammenhang mit den Planungen zur Erweiterung der niedersächsischen Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen (SDH) stellte sich die Frage nach der Lebensdauer von Betonbauteilen in Kontakt mit Deponiesickerwasser. Dazu wurden an Proben eines sehr dichten und dauerhaften Betons Korrosionsversuche durchgeführt. Es wurden Proben drucklos und unter 10 bar Druck über eine Zeitdauer von maximal einem Jahr in zwei synthetische Sickerwässer und zum Vergleich in Trinkwasser eingelagert. Die beiden korrosiven Flüssigkeiten enthielten bis zu 6036 mg/l Ammonium, 12700 mg/l Sulfat, 22319 mg/l Chlorid und andere betonangreifende Ionen. Die Versuche wurden sowohl bei 3,5°C als auch bei 35°C durchgeführt.

Die Proben wurden nach 6 bzw. 12 Monaten auf Veränderungen des Phasenbestandes mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie und der Differentialthermoanalyse/gravimetrie untersucht. Weiterhin wurde die axiale Zugfestigkeit der Proben, die Sauerstoffpermeabilität, die Porenradienverteilung und der Chloridgehalt der Proben gemessen. Außerdem wurde der Korrosionszustand einbetonierter Bewehrung untersucht und die Oberfläche der korrodierten Proben mikroskopisch vermessen.

Während der Einlagerung bildeten sich je nach korrosivem Medium auf der Oberfläche der Proben und teilweise auch im oberflächennahen Beton die Phasenneubildungen Gips, $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$. Risse traten nicht auf. An den Proben die einer Lösung mit 6036 mg/l Ammonium ausgesetzt waren, konnte ein lösender Angriff beobachtet werden. Dieser Angriff äußerte sich in einer Abtragung des Bindemittels, die nach einjähriger Beaufschlagung bei 35°C den größten beobachteten Wert von ca. 0,8 mm erreichte. Diese Proben zeigten auch einen erheblichen Abfall der axialen Zugfestigkeit und einen starken Anstieg der Sauerstoffpermeabilität. Die bei 3,5°C einem lösenden Angriff ausgesetzten Proben zeigten zwar ebenfalls eine hohe Abtragsrate, aber keinen Abfall der axialen Zugfestigkeit und keinen Anstieg der Sauerstoffpermeabilität im Vergleich zu den wassergelagerten Proben.

Trotz sehr großer gemessener Chloridgehalte, auch in größerer Tiefe der Proben, konnte an einbetonierten Bewehrungsstählen keinerlei verstärkte Korrosion im Vergleich mit wassergelagerten Proben beobachtet werden. Die großen analysierten Chloridgehalte werden auf die Ausfällung des oben genannten basischen Zinkchlorids im Porenraum des Betons zurückgeführt.

Aus den vorliegenden experimentellen Ergebnissen wird geschlossen, daß eine Gefährdung von Betonbauteilen in der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen und vergleichbaren Deponien durch chemischen Angriff innerhalb einer normalen Betriebsdauer von einigen Jahren bis wenigen Jahrzehnten mit großer Sicherheit nicht zu erwarten ist, wenn ein Beton verwendet wird der ähnliche Eigenschaften aufweist, wie der in diesem Forschungsprojekt untersuchte. Das gleiche gilt bezüglich einer Bewehrungskorrosion aufgrund gelöster Ionen.

2. EINLEITUNG

Im Zusammenhang mit den Planungen zur Erweiterung der niedersächsischen Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen (SDH) durch mehrere Ringschächte aus Beton wurden vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig zwei Forschungsvorhaben durchgeführt, die sich mit dem Einsatz von Beton in solchen Deponiebauwerken beschäftigen.

Mit Hilfe von Schachtbauwerken kann das Platzangebot eines vorhandenen Deponiegeländes wesentlich besser genutzt werden. Die daraus folgende Verringerung der Deponieumschließungsfläche hat den Vorteil, daß die Dichteigenschaft der Deponie besser überwacht werden kann. Weiterhin ist bei kompakten Bauwerken, wie sie Schächte aus Beton darstellen, eine Überdachung gegenüber Polderdeponien vergleichsweise leicht realisierbar. Die Überdachung einer Deponie während der Betriebsphase ist ein wesentliches Instrument zur Sickerwasserverminderung.

Eine solche Überdachung ist z.B. auch in der Planung zur Erweiterung der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen vorgesehen. Außerdem soll durch die Einlagebedingungen sichergestellt werden, daß aus dem Abfall selbst keinerlei Sickerwasser austritt. Trotzdem ist mit einer langsamen Befüllung der Deponie von unten her mit Grundwasser zu rechnen, das dabei alle Charakteristiken eines Sickerwassers annehmen wird. Darum sind die hier zugrundegelegten Überlegungen und Experimente auch für diesen Fall gültig.

Deponiesickerwässer enthalten betonangreifende Stoffe zum Teil in sehr hohen Konzentrationen. Die chemische Zusammensetzung dieser Flüssigkeiten ist sehr komplex und schwankt in weiten Grenzen.

Deshalb wurden in einem ersten Forschungsvorhaben Betonrezepturen entwickelt und anhand von Korrosionsversuchen erprobt, die einen großen Widerstand gegen

korrosive Einflüsse durch Deponiesickerwässer und ähnliche Flüssigkeiten aufweisen. Über dieses Forschungsvorhaben wurde in /1,2/ berichtet.

In einem zweiten Forschungsvorhaben sollten dann praxisnahe Betonkörper hergestellt werden, die dann in zeitraffenden Korrosionsversuchen auf ihre Lebensdauer in Kontakt mit Deponiesickerwasser untersucht werden sollten. Diese Untersuchungen sind Gegenstand dieses Abschlußberichtes.

3. CHARAKTERISIERUNG DER KORROSIVEN MEDIEN IN HINBLICK AUF DEN BAUSTOFF BETON

Eine genaue Identifizierung der betonangreifenden Inhaltsstoffe der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen wurde schon in /1/ durchgeführt. Hier werden noch einmal die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Die folgende Tabelle gibt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick über die Zusammensetzung der bisher in Hoheneggelsen anfallenden Deponiesickerwässer in Bezug auf die wichtigsten betonangreifenden Stoffe. Zum Vergleich sind die Grenzwerte für sehr starken chemischen Angriff nach DIN 4030 /N1/ und die Zusammensetzung von Meerwasser (Nordsee) angegeben.

Tab. 1: Wichtige betonangreifende Stoffe in den Sickerwässern der Deponie Hoheneggelsen.

	Einheit	Hoheneggelsen		Sehr st. chem. Angriff	Meer- wasser
		Min.	Max.		
ph Wert		4,5	12,5	4,5	
Ammonium	mg/l	<0,04	446	60	
Magnesium	mg/l	0,662	1090	3000	1330
Eisen	mg/l	<0,1	2470		
Mangan	mg/l	<0,1	1900		
Zink	mg/l	0,002	2000		
Sulfat	mg/l	<0,5	12700	3000	2780
Chlorid	mg/l	111	13600		19890

Die Tabelle 10 im Anhang zeigt darüberhinaus die Analysenwerte weiterer Substanzen, ebenfalls ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Zum Vergleich sind Maxima-Minima Werte von Sickerwässern verschiedener Hausmüll- und Sonderabfalldeponien angegeben, die den Literaturstellen /3,4/ entnommen sind. Ausgewertet wurden chemische Analysen der Wässer aus den Brunnen P1 - P15 der Deponie Hoheneggelsen. Diese Polderbrunnen stehen direkt im Abfallkörper. Die Brunnen P1 - P9 aus dem Deponiebereich 1, dem ältesten Bereich der Deponie, wurden 1986 von der Firma NATEC sowie 1988 von der Firma Ökolimna (Burgwedel) untersucht. Die Brunnen P10 bis P15 aus dem Deponiebereich 2 werden jährlich abwechselnd vom Betriebslabor der SDH (1987 und 1989) und dem niedersächsischen Landesamt für Wasserwirtschaft (Hildesheim) untersucht (1988 und 1990). Die Analysen des niedersächsischen Landesamtes wurden in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt. Es wurden nicht in allen Brunnen alle Substanzen analysiert. Desweiteren wurden solche Stoffe ausgelassen, die zwar analysiert, aber nicht nachgewiesen werden konnten. Die Tabelle gibt lediglich die Maxima-Minima Werte in ihrer gesamten Spannweite an, sie läßt keine Rückschlüsse auf einzelne Brunnen zu.

Die Deponie ist aufgeteilt in alkalische, neutrale sowie ölhaltige Bereiche. In vielen Brunnen findet man deshalb kaum organische Substanzen, dafür um so mehr anorganische Verunreinigungen und umgekehrt. Im organischen Bereich der Altdeponie kommt es vor, daß auf der wässrigen Phase der Lösungen teerige, ölige Schichten von z.T. fester Konsistenz aufschwimmen.

Im Forschungsbericht /1/ wurde ausführlich dargelegt, daß die Konzentrationen vieler gelöster Substanzen in den Deponiesickerwässern der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Gleichgewichte mit entsprechenden schwerlöslichen Verbindungen gesteuert werden. Im Falle dieser Substanzen ist in Zukunft nicht mit wesentlich größeren Maximalkonzentrationen in den Sickerwässern zu rechnen, wenn die entsprechenden Gegenionen vorhanden sind. Der Vergleich mit den Sickerwasseranalysen anderer Deponien stützt diese These.

Ionen, deren Konzentration nicht durch schwerlösliche Verbindungen begrenzt werden, sind jedoch durchaus auch in weit größeren Konzentrationen zu erwarten. So sind z.B. viele Ammoniumverbindungen, Nitrite, Nitrate und viele Chloride sehr leicht löslich. Es ist nicht möglich, eine Voraussage über die zu erwartende Konzentration dieser vier Anionen zu machen. Der Vergleich der

Sickerwässer aus Hoheneggelsen mit den Sickerwässern anderer Deponien zeigt deutlich, daß diese Stoffe, sowie zusätzlich Kalium in anderen Deponien in noch bedeutend größeren Konzentrationen auftreten können. In anderen Deponiesickerwässern hat man z.B. durchaus Ammoniumkonzentrationen bis 6036 mg/l und Chloridkonzentrationen bis 36146 mg/l gefunden. Dies könnte in Zukunft auch bei den Sickerwässern aus Hoheneggelsen möglich sein. Auch der Anteil organischer Substanzen könnte durchaus noch ansteigen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß insbesondere mit einem lösenden Angriff durch Ammonium, Eisen, Mangan, Zink und Magnesium, sowie durch den teilweise niedrigen pH-Wert zu rechnen ist. Die übrigen austauschfähigen Kationen liegen in vergleichsweise niedrigen Konzentrationen vor. Treibende Prozesse sind im wesentlichen nur durch den Sulfatgehalt zu erwarten. Kalklösende Kohlensäure wurde nicht bestimmt. Kalklösende Kohlensäure kommt in Deponiesickerwasser aber durchaus vor. In Sickerwasser aus Hausmülldeponien wurde nach /3/ kalkaggressive Kohlensäure bis 200 mg/l festgestellt. Durch die mikrobielle Umsetzung von organischen Komponenten entsteht CO_2 . Bei einer Gasuntersuchung durch das Labor für Geoanalytik (Hildesheim) im Herbst 1988 konnte im Gasraum des Polderbrunnens 3 eine CO_2 Konzentration von 0,3 Vol.% nachgewiesen werden. In den Brunnen 1, 2 und 4 bis 9 lag die entsprechende Konzentration unter der Nachweisgrenze von 0,1 Vol.%. Der Polderbrunnen 3 zeigte 1988 von den genannten Brunnen den größten CSB- und BSB₅-Wert. In diesem Brunnen konnten auch nennenswerte Mengen Methan beobachtet werden. Besonders in den Bereichen, in denen große Mengen organisches Material eingelagert wird und die Sickerwässer gleichzeitig nur eine geringe Härte aufweisen, ist auch in Sonderabfalldeponien mit kalklösender Kohlensäure in hohen Konzentrationen zu rechnen.

4. FÜR DIE VERSUCHE VERWENDETE FLÜSSIGKEITEN

Aus den großen Konzentrationsbereichen, in denen sich die Sickerwässer der Deponie Hoheneggelsen bewegen ist ersichtlich, daß es ein typisches Deponiesickerwasser nicht gibt. Es wurde deshalb auch schon in /1/ versucht, durch Verwendung mehrerer korrosiver Flüssigkeiten den maximalen Bereich eines möglichen korrosiven Angriffs auf Beton zu erfassen.

Während der hier beschriebenen Korrosionsversuche wurden die Betonproben mit zwei verschiedenen synthetischen Deponiesickerwässern beaufschlagt, die im folgenden mit Lö2 und Lö4 bezeichnet werden. Die Bezeichnungen Lö1 und Lö3 werden in diesem Bericht nicht verwendet, um Verwechslungen mit den entsprechenden Flüssigkeiten aus /1/ zu vermeiden.

Die chemische Zusammensetzung der beiden Flüssigkeiten wurde nach folgenden Gesichtspunkten gewählt:

Flüssigkeit Lö2:

Die Flüssigkeit Lö2, die auch schon in den Untersuchungen /1/ verwendet wurde, enthält alle nennenswerten anorganischen Inhaltstoffe der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen. Beim pH-Wert dieser Lösung sollten jedoch noch keine Ausfällungen zu beobachten sein. Darum sind in dieser Lösung kein Barium, kein Fluorid und kein Sulfid enthalten. Die Konzentrationen der Inhaltstoffe wurden auf die Maximalwerte der SDH Analysen eingestellt, mit Ausnahme der Konzentration von Eisen, Calcium, Natrium und Chrom. Calcium kann hemmend auf betonkorrosive Prozesse einwirken. Die Wirkung von Eisen ist nicht eindeutig festzulegen. Eisen kann als austauschfähiges Kation wirken, kann aber auch korrosive Prozesse hemmen. Weiterhin gibt es Anzeichen dafür, daß das Vorhandensein von Eisenionen die Sulfatkorrosion durch Bildung eines kurzstengeligen, nicht treibenden Ettringits vermindert /5/. Deshalb wurden beide Ionen auf die Minimalwerte der SDH Analysen eingestellt. Natrium diente als Ion, über das der restliche Ladungsausgleich vorgenommen wurde. Chrom war nur in Form des leichtlöslichen Chromnitrats zu handhaben. Wegen des begrenzenden Nitratgehaltes wurde der Chromgehalt auf einen relativ niedrigen Wert eingestellt.

Flüssigkeit Lö4:

In /1/ konnte kein eindeutiges Indiz für einen treibenden Angriff auf Beton nach Einlagerung in die korrosiven Flüssigkeit festgestellt werden. Dafür konnte deutlich ein lösender Angriff durch Ammonium bzw. durch einen zu niedrigen pH-Wert beobachtet werden. Da in der Deponie Hoheneggelsen keine sauer reagierenden Abfälle eingelagert werden dürfen ist die Gefährdung durch saure Sickerwässer aber als gering einzuschätzen. Ein lösender Angriff durch austauschfähige Salze ist jedoch zu erwarten, wobei insbesondere der Ammoniumgehalt des Abwassers nicht durch die Bildung von schwerlöslichen Verbindungen nach oben begrenzt wird. Daher wurde eine Flüssigkeit hergestellt, die Ammo-

nium, Magnesium, Mangan und Zink in den Konzentrationen enthielt, die nach Tabelle 10 als Maximalkonzentrationen für Deponiesickerwässer beobachtet wurden. Diese Lösung enthielt aus den bei der Flüssigkeit Lö2 genannten Gründen kein Eisen und auch kein Sulfat, um einen maximalen lösenden Angriff zu bewirken. Zusätzlich wurde der Chloridgehalt dieser Lösung sehr hoch eingestellt.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Konzentrationen in den Beaufschlagungsflüssigkeiten. Zu Vergleichszwecken wurden Betonproben auch in Trinkwasser eingelagert.

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der Beaufschlagungsflüssigkeiten.

Komponente	Einh.	Lö2	Lö4
pH-Wert		5,0	4,5
Calcium	mg/l	96,000	
Magnesium	mg/l	1090,0	2000,0
Mangan (II)	mg/l	1900,0	1900,0
Chrom (III)	mg/l	2,91	
Kupfer	mg/l	16,5	
Nickel	mg/l	7,400	
Zink	mg/l	2000,0	2000,0
Blei (II)	mg/l	1,05	
Cobald	mg/l	5,00	
Ammonium	mg/l	446,0	6036
Natrium	mg/l	8280,8	
Kalium	mg/l	1460,0	
Chlorid	mg/l	13600	22319
Sulfat	mg/l	12700	
Nitrat	mg/l	10,40	
Nitrit	mg/l	0,65	
Borat	mg/l	163,2	

5. HERSTELLUNG VON PROBEKÖRPERN

5.1. Verwendeter Beton

In /1/ wurden insgesamt 8 verschiedene Betone vergleichend auf ihre Korrosionsbeständigkeit in synthetischen und realem Deponiesickerwasser untersucht. Vor allem aufgrund der vergleichsweise kleinen Transportkoeffizienten, der günstigen Porenradienverteilung, einem großen Widerstand gegen das Eindringen von Chlorid, der geringen Wärmeentwicklung und einem sehr geringen Wassereindringen erschien ein Beton mit hochgeschlacktem Hochofenzement mit Flugaschezusatz als die günstigste getestete Rezeptur. Diese Rezeptur wurde deshalb für die hier beschriebenen Versuche benutzt. Der folgende Mischungsentwurf wurde für die Herstellung der Probekörper zugrundegelegt:

Tabelle 3: Mischungsentwurf des Versuchsbetons.

Zement	HOZ 35 L-NW/HS/NA
Zementmasse	354 kg/m ³ Beton
Betonzusatzstoff	Flugasche KM/C (Fa. Baumineral) aus Schmelzkammerfeuerung
Zusatzstoffmasse	89 kg/m ³ Beton
Wasserzementwert	0,47
Zuschlag	silikatischer Zuschlag, Sieblinie A/B 16
Zuschlagmasse	1760 kg/m ³ Beton
Verflüssiger	Woermann BV 25, 1,04 % vom Zementgewicht

Am 23.5.1991 wurde ein Probekörper mit den Abmessungen 96x60x60 cm, in leicht saugender Holzschalung hergestellt. Der Beton wurde mit einer Rüttelflasche verdichtet. Im unteren Bereich der Probe wurden 8 Betonstähle, BST 500 S, Durchmesser 10 mm eingelegt, um auch Probekörper mit Bewehrung zur Verfügung zu haben. Der Beton wurde drei Tage abgedeckt in Schalung belassen. Danach wurde der Versuchskörper entschalt und zunächst 92 Tage an der freien Witterung gelagert. Dies entspricht den Verhältnissen in einer Sonderabfalldeponie, in der ein Betonringschacht erst nach Beendigung der Bauzeit und Beginn

der Einlagerung zum ersten Male mit Deponiesickerwasser in Berührung kommen würde.

5.2. Frisch- und Festbetonkennwerte

Die in /1/ mit dieser Betonrezeptur gemessene Konsistenz KR konnte in diesem Fall mit einem Ausbreitmaß von 37 cm nicht erreicht werden. Da der zugegebene Verflüssiger Woerment BV 25 aber ein sehr moderater Verflüssiger ist, sollte es möglich sein bei Verwendung eines stärkeren Verflüssigers auch sicher die Konsistenz KR zu erreichen. Die Würfeldruckfestigkeit des Betons wurde nach 1, 4, 7 und 28 Tagen an je 3 Würfeln mit 15 cm Kantenlänge geprüft. Die Wassereindringtiefe wurde im Prüfaller von 32 Tagen untersucht. Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Frisch- und Festbetonkennwerte:

Tabelle 4: Frisch- und Festbetonkennwerte des Versuchsbetons.

	Dieses Vorhaben	Vergleichswerte aus /1/
Ausbreitmaß in cm	37	42
Rohdichte in kg/l	2,35	2,34
Luftporengehalt in %	1,8	1,5
Würfel Druckfestigkeiten (15 cm Würfel, keine Umrechnung auf Würfel mit 20 cm Kantenlänge) in N/mm ² :		
Alter 1 Tag:	4,69	
Alter 4 Tage:	22	
Alter 7 Tage:	32	26
Alter 28 Tage:	51	46
Alter 90 Tage:		49
Alter 180 Tage:		55
Mittlere Wassereindringtiefe in mm	7	8

5.3. Probenpräparation

Im Alter von 92 Tagen wurden aus dem hergestellten Probekörper insgesamt 20 Kerne, Durchmesser 10 cm entnommen. Alle ab diesem Zeitpunkt präparierten Probekörper wurden im Klimaraum bei 20 °C und 65 % r.F. aufbewahrt. Die Lage der Kerne zeigt die Abbildung 1.

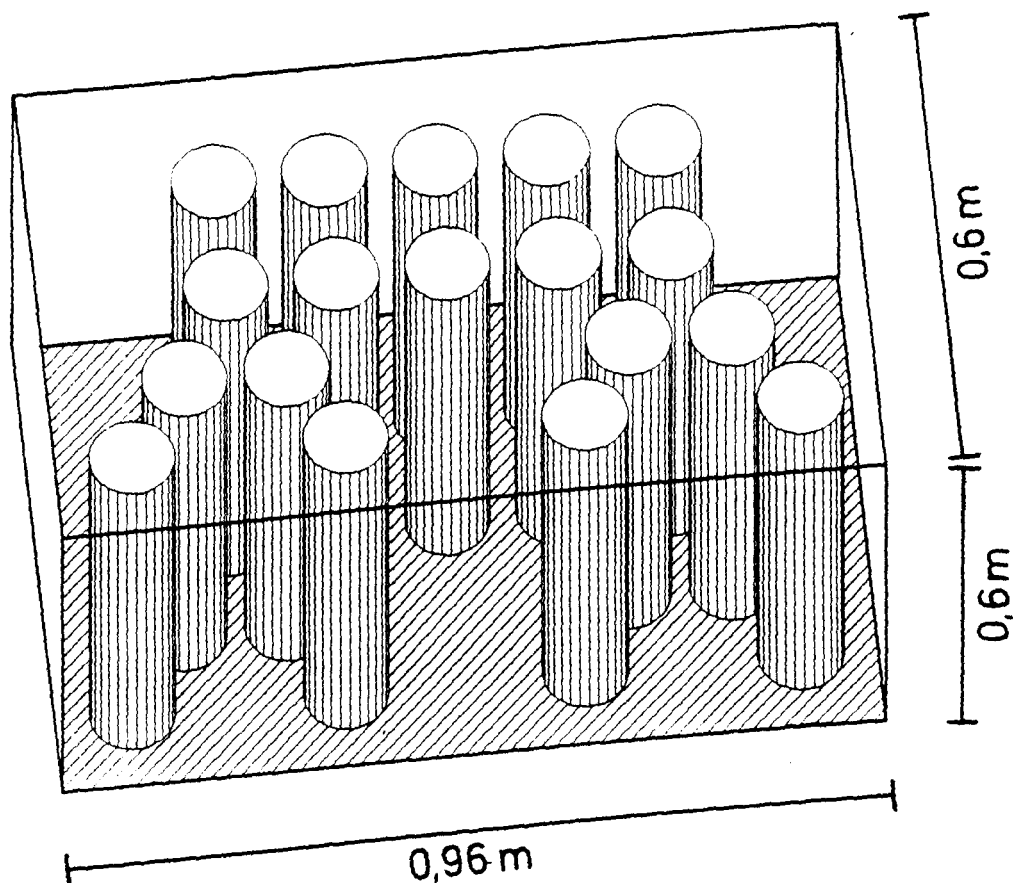


Abbildung 1: Betonprobekörper mit Kernbohrungen.

Die Kerne wurden dann im Alter von 106 Tagen in Scheiben bzw. Zylinder zersägt, die für die Korrosionsversuche benutzt wurden (Abbildung 2). Es wurden insgesamt 24 Zylinder ohne Bewehrung und 4 Zylinder mit Bewehrung, jeweils mit 10 cm Durchmesser und 20 cm Höhe hergestellt. Weiterhin wurden 28 Scheiben mit 10 cm Durchmesser und 5 cm Höhe hergestellt. An die Zylinder mit Bewehrung wurde an jeden Bewehrungsstahl ein isoliertes Kabel angelötet, mit dem die Stähle untereinander leitend verbunden wurden, was dem tatsächlichen

Zustand im Bauwerk entspricht. Anschließend wurden diese Zylinder an ihrer Umfangfläche mit einem Epoxidharz abgedichtet um einen unidirektionalen Stofftransport sicherzustellen. Die genaue Lage der Bewehrung in diesen Zylindern kann den Abbildungen 3 und 4 im Kapitel 8.4. entnommen werden.

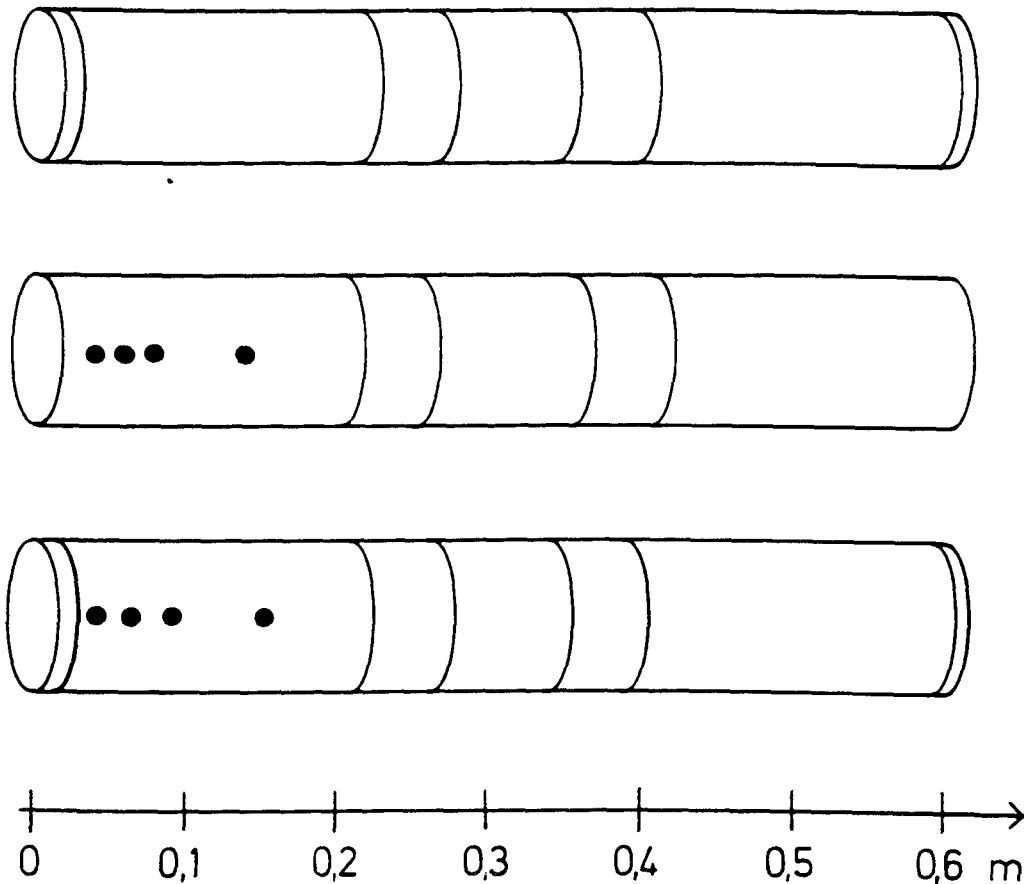


Abbildung 2: Zersägen der ausgebohrten Kerne in Scheiben mit 5 cm Höhe und Zylinder mit 20 cm Höhe. Oben: Zylinder ohne Bewehrung. Mitte und unten: Zylinder mit Bewehrung.

6. ZUSÄTZLICHE UNTERSUCHUNGEN AM UNKORRODIERTEN BETON

Die Sauerstoffpermeabilität des unkorrodierten Betons wurde mit einer Apparatur nach dem System des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) gemessen. Die Sauerstoffpermeabilität wird geprüft, indem eine abgedichtete Materialprobe

auf einer Seite mit Sauerstoff unter definiertem Druck beaufschlagt wird und auf der anderen Seite die hindurchgetretene Durchflußmenge in Abhängigkeit vom Eingangsdruck gemessen wird. Das Verfahren wird in /6/ beschrieben. Im Gegensatz zur dortigen Beschreibung wurde die PU Manschette, die die Probe nach außen abdichtet, mit einem Gummischlauch angepresst und nicht mechanisch. Im Anhang findet sich unter der Abbildung 9 eine Schnittzeichnung der Apparatur. Die Proben wurden nach dem nassen Zuschneiden mindestens 39-41 Tage im Klimaraum bei 20°C und 65% r.F. getrocknet. Dieses Verfahren wurde einer schärferen Trocknungsmethode vorgezogen, da diese Proben auch noch für die Korrosionsversuche benutzt werden sollten. Ihre Porenstruktur sollte durch die Trocknung nicht wesentlich verändert werden. Eine ähnliche Trocknungsmethode wurde auch in /7/ angewandt. Die gemessene Sauerstoffpermeabilität betrug $4,2 \cdot 10^{-17} \pm 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und liegt damit in der gleichen Größenordnung die für diesen Beton in /1/ gemessen wurde. Die Einzelmessung aller für die Korrosionsversuche vorgesehenen Proben war notwendig um die Veränderungen der Sauerstoffpermeabilität durch den jeweiligen Korrosionsprozess beobachten zu können.

7. ZEITRAFFENDE KORROSIONSVERSUCHE

Es wurde eine drucklose Beaufschlagung mit den Flüssigkeiten Lö2 und Lö4 sowohl bei 3,5°C als auch bei 35°C durchgeführt. Zu Vergleichszwecken wurden Proben auch bei der jeweiligen Temperatur in Trinkwasser eingelagert. Darüberhinaus wurden Proben mit der Flüssigkeit Lö4 unter 10 bar Druck beaufschlagt. Auch diese Versuche wurden bei 3,5 bzw. 35°C durchgeführt. Die Proben mit Bewehrung wurden mit der Flüssigkeit Lö4 und zum Vergleich mit Trinkwasser ebenfalls bei 3,5°C und 35°C beaufschlagt.

Im Gegensatz zu den Versuchen in /1/ wurden in diesem Fall zwei verschiedene, von Raumtemperatur erheblich abweichende Temperaturen gewählt. Die für die Erweiterung der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen geplanten Ringschächte aus Beton sollen bis zu einer Tiefe von ca. 65 m abgeteuft werden. 10-20 m unter der Erdoberfläche herrscht im Normalfall die Jahresmitteltemperatur /8/, die in Braunschweig (ca. 25 km östlich von Hoheneggelsen) etwa 8,6°C beträgt /N2/. Darunter steigt die Temperatur im Durchschnitt um 1°C je 33 m an. Da mit Sickerwasseransammlungen vor allem im Sohlbereich einer Ringschachtdeponie zu

rechnen ist, werden in diesem Bereich Temperaturen von etwa 9,5°C zu erwarten sein. Höhere Temperaturen sind nur dann zu erwarten, wenn Abfälle noch nicht ausreagiert haben, was jedoch durch die Einlagerungsbedingungen i.d.R. ausgeschlossen wird, oder wenn eine Zersetzung von organischem Material zu erwarten ist.

Im Falle erhöhter Temperaturen nimmt sowohl die Transportgeschwindigkeit von Schadstoffen, als auch die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen zu. Im Falle einer Schachtdeponie ist damit zu rechnen, daß die Permeabilität und die Ionendiffusion in wässriger Phase für den Schadstofftransport langfristig den größten Beitrag liefern. Die Temperaturabhängigkeit des Permeabilitätskoeffizienten ergibt sich aus dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz /6/ und wird im wesentlichen durch die Temperaturabhängigkeit der Flüssigkeitsviskosität bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Ionendiffusion in flüssiger Phase kann über die Nernst-Hartley-Gleichung berechnet werden. Danach sind die entsprechenden Diffusionskoeffizienten direkt proportional der Temperatur /9/. Für die chemische Kinetik gilt die Faustregel, daß sich die Geschwindigkeit chemischer Reaktion pro 10°C Temperaturerhöhung etwa verdoppelt. Bei erhöhter Temperatur ist deshalb grundsätzlich mit einer verstärkten Korrosion zu rechnen. Dies wird jedoch dadurch eingeschränkt, daß Phasen bei gegebenem Druck immer nur in einem definierten Temperaturbereich stabil sind. Daraus ergibt sich, daß bei niedrigen Temperaturen eventuell Korrosionsreaktionen ablaufen können, die bei erhöhter Temperatur aus thermodynamischen Gründen überhaupt nicht mehr möglich sind. Ähnliches gilt auch für die Variablen Druck und Konzentration. So kann man z.B. beim Beaufschlagen von Beton mit sulfathaltigen Wässern bei sehr großen Sulfatgehalten ein Zurücktreten der Ettringitbildung gegenüber der Gipsbildung beobachten /10/. Darin liegt das grundsätzliche "Dilemma" sogenannter Zeitrafferversuche. Man kann zwar versuchen eine Reaktion durch erhöhte Temperaturen, Drücke und Konzentrationen zu beschleunigen, läuft aber Gefahr dadurch völlig andere Reaktionsmechanismen zu initiieren.

Um eine Zeitraffung zu erreichen, gleichzeitig aber auch realistische Umgebungsbedingungen zu untersuchen, haben wir Versuche bei 2 verschiedenen Temperaturen (3,5°C, 35°C) und sowohl unter Normaldruck als auch bei erhöhtem Druck durchgeführt. Die Hälfte der Proben wurden 6 Monate mit den korrosiven Flüssigkeiten beaufschlagt, die zweite Hälfte der Proben wurde 12 Monate beaufschlagt. Die Flüssigkeiten wurden monatlich erneuert.

Die Versuche wurden in zwei Klimakammern der Firma Weiss durchgeführt. Diese Klimakammern erreichen eine Regelgenauigkeit von $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Innerhalb des Klimaraums können jedoch Temperaturgradienten bis zu $\pm 1^\circ\text{C}$ auftreten. Während des heißen Sommers 1992 war es aber nicht möglich die Solltemperatur der kühleren Klimakammer von $3,5^\circ\text{C}$ konstant zu halten. Teilweise traten über Tage hinweg Temperaturen von 10°C auf. Im Falle der wärmeren Klimakammer trat während der letzten 6 Monate der Versuche ein Defekt am Kühlsystem auf, der mit den vorhandenen Mitteln nicht zu beheben war. Dadurch konnte die Temperatur dieser Versuche nur auf $\pm 2^\circ\text{C}$ genau geregelt werden.

7.1. DRUCKLOSE BEAUFSCHLAGUNG

Die Korrosionsversuche mit druckloser Beaufschlagung wurden in abgedeckten Wannen mit einer Größe von $20 \times 41 \times 31$ cm durchgeführt. Die Wannen wurden nach Einlagerung der Proben jeweils 4 cm hoch mit den jeweiligen Flüssigkeiten befüllt. Pro Flüssigkeit und Temperatur wurden 4 Zylinder (20 cm Höhe, 10 cm Durchmesser) und 4 Scheiben (5 cm Höhe, 10 cm Durchmesser) eingelagert. Zusätzlich wurden vier auf der Umfangfläche abgedichtete Zylinder mit innenliegender Bewehrung in Trinkwasser und in die Flüssigkeit Lö4 eingelagert. Die Zylinder standen aufrecht in der Flüssigkeit, die Scheiben wurden teilweise liegend, teilweise auf der Umfangfläche stehend eingelagert. Die teilweise Einlagerung wurde wie in /1/ gewählt, um Veränderungen an den Proben am Übergang feucht - trocken, an der oft die größten Schäden auftreten, beobachten zu können. Da nach 6 bzw. 12 Monaten jeweils die Hälfte der Proben aus den Lösungen entnommen wurde, standen für die Untersuchungen pro Flüssigkeit und Temperatur zwei Scheiben und zwei Zylinder zur Verfügung.

7.2. DRUCKBEAUFSCHLAGUNG

Jeweils 2 Betonproben wurden unter 10 bar Druck bei $3,5^\circ\text{C}$ und 35°C mit der Flüssigkeit Lö4 beaufschlagt. Dazu wurde die gleiche Druckapparatur benutzt, die für die Durchführung der Versuche in /1/ gebaut wurde. Eine Skizze dieser Apparatur findet sich im Anhang unter der Abbildung 10. Die Betonproben wurden mit einem hochchemikalienbeständigen Epoxidharz (Araldit AV138M/HV998 der Firma Ciba Geigy) in einen Edelstahlring (WN 4541) eingeklebt. Dieser Ring

wurde an beiden Enden durch eine Platte aus Edelstahl (WN 4571) verschlossen. Als Dichtung zwischen den Stahlteilen wurde je eine 1 mm starke PTFE Scheibe eingelegt. Die Platten waren beide mit Bohrungen (NPT Gewinde) zur Flüssigkeitszufuhr und zum Flüssigkeitsablauf versehen. Die Platte auf der drucklosen Seite der Druckzelle wurde mit eingefrästen Rillen versehen, so daß die Betonprobe auf dieser Platte direkt aufsitzen konnte, ohne den Ablauf von Flüssigkeit zu behindern.

Der Vorratsbehälter für die Beaufschlagungsflüssigkeit ist nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. In die Zelle wurde eine Membrane aus PE eingebaut, die die Beaufschlagungsflüssigkeit vom Druckmedium (Pressluft) abtrennen sollte. Alle Verbindungen zwischen den Druckbehältern wurden in PTFE ausgeführt. Zur Druckerzeugung wurde ein 15 bar Kompressor benutzt, die Druckregelung erfolgte über zwei handelsübliche Druckminderer. In der Regel konnte damit der Druck auf $\pm 0,1$ bar konstant gehalten werden. Auch die Flüssigkeit in der Druckapparatur wurde monatlich erneuert. Der Durchfluß durch die Proben war so gering, daß innerhalb der Apparatur von konstanten Druckverhältnissen ausgegangen werden kann.

7.3. PRÄPARATION DER PROBEN NACH DEM BEAUFSCHLAGEN

Nach dem Ende der fünfmonatigen Beaufschlagung wurden die Scheiben zunächst an der Luft getrocknet. Lose anhaftende Teile von abgeschiedenen Substanzen wurden mechanisch durch Schaben und Abreiben von der Betonoberfläche entfernt. Die aufgefangenen Substanzen wurden gesammelt. Die Oberfläche der Proben wurde anschließend mikroskopisch untersucht. Die Scheiben wurden dann für 28 Tage in ein Normklima 20°C , 65% r.F. verbracht. Nach dieser Trocknungsperiode wurden die Proben wieder auf ihre Sauerstoffpermeabilität untersucht. Anschließend wurden aus den Proben Pulver aus der Tiefe von 0 - 1 cm, bzw. 2-3 cm durch Bohren entnommen. Diese Pulver wurden zur Phasenanalyse und zur chemischen Analyse benutzt. Teile der Proben wurden dann zur Bestimmung der Porenradienverteilung benutzt.

Die Zylinder wurden an den Seitenflächen leicht angeschliffen und anschließend zur Bestimmung der axialen Zugfestigkeit benutzt. Zwischen den Bearbeitungsschritten wurden diese Proben in Folie aufbewahrt um ein Trocknen zu vermeiden.

8. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

8.1. Makroskopische Veränderungen der Proben

An den Proben und der Beaufschlagungsflüssigkeit waren typische Veränderungen zu beobachten, wie Kristallneubildungen an den Betonoberflächen, die Bildung eines Bodensatzes, eine starke Verfärbung der Proben usw.. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die beobachteten Veränderungen.

Tabelle 5: Makroskopische Veränderungen der Proben und der korrosiven Flüssigkeiten während dem Beaufschlagen.

	Lö2 3,5 °C	35 °C	Lö4 3,5 °C	35 °C
pH Probe	6 Helle Kristalle auf der Probe	6 Leicht bräunliche Verfärbung, helle Kristalle auf der Probe	7 Brauner Belag am Bindemittel, nach Trocknung hell	7 Dunkle Verfärbung
Bodensatz	Bläulich grün	Helle Nadeln	Plättchenförmig, dunkel, nach Trocknung hell	Plättchenförmig, dunkelbraun

Die Veränderungen an den unter Druck eingelagerten Proben entsprechen den Veränderungen der drucklos eingelagerten Proben.

Wie schon in /1/ durchgeführt, wurden auch die Oberfläche der hier untersuchten Proben unter dem Mikroskop untersucht. Ein lösender Angriff führt bei Beton mit silikatischen Zuschlägen zu einem Anlösen des Bindemittels, während

die Zuschlagoberflächen in der Regel unbeeinflusst bleiben. Es entstehen dann Stufen zwischen Zementstein und Zuschlägen.

Ein lösender Angriff konnte nur bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 beobachtet werden. Zunächst wurden die Proben mit einem Tuch trocken abgerieben. Danach konnten bei den Proben die bei 35°C in die Flüssigkeit Lö4 eingelagert wurden Stufenhöhen von ca. 200 Mikrometer vermessen werden. Eine Untersuchung der bei 3,5°C eingelagerten Proben war nicht möglich, da die Oberfläche durch einen weichen, nicht trocken abreibbaren Belag verschmiert wurde. Daraufhin wurde die Oberfläche der Proben solange mit einer Drahtbürste bearbeitet, bis kein merklicher Abrieb mehr vorhanden war. Die Oberfläche der wassergelagerten Proben wurde mit einer solchen Prozedur nicht geschädigt. Die Dicke, der mit dieser Methode zu entfernenden Schicht des Bindemittels wird im folgenden als Abtragungsrate bezeichnet. Nach 6-monatiger Einlagerung bei 35°C konnte anschließend eine durchschnittliche Stufenhöhe von ca. 550 Mikrometer, bei Maximalwerten um 800 Mikrometer vermessen werden. Die Proben die nach 12-monatiger Einlagerung aus der korrosiven Flüssigkeit entnommen wurden zeigten keine signifikant größere Abtragungsrate. Nach 6-monatiger Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 bei 3,5°C konnte eine durchschnittliche Abtragungsrate von ca. 200 Mikrometer, bei Maximalwerten um 230 Mikrometer festgestellt werden. Auch hier konnte bei den Proben die nach 12 Monaten aus der Flüssigkeit entnommen wurden, keine signifikant größere Abtragungsrate festgestellt werden.

Bemerkenswert war auch, daß die größten Abtragungsraten bei diesen Versuchen wenig oberhalb des Flüssigkeitspiegels beobachtet werden konnten. Unterhalb des Flüssigkeitspiegels zeigten die Proben praktisch keinerlei Abtrag. Dies muß nicht immer so sein. In den in /1/ vorgestellten Versuchen lag die Zone stärkster lösender Beanspruchung unterhalb des Flüssigkeitspiegels. Dieses Ergebniss macht jedoch deutlich, daß Proben bei Korrosionsversuchen nicht vollständig eingetaucht werden sollten. Die größten Schäden treten oft im Übergangsbereich feucht-trocken auf. Die hier zu beobachteten Schäden in diesem Übergangsbereich sind sicherlich nicht darauf zurückzuführen, daß in diesem Bereich das Lösungsmittel verdampft und kristallisierende Salze Schäden hervorrufen, da die Probenbehälter während der Versuche geschlossen waren. Eventuell kann das bei der Ammoniumkorrosion entstehende Ammoniak durch den trockenen Beton leichter entweichen, so daß in der feucht-trocken Übergangszone der größte Reaktionsumsatz der Korrosionsreaktion stattfindet.

Die in die Lösung 4 eingelagerten Betonproben wurden mit Hilfe des Phenolphthaleintests untersucht. Die Dicke der Zone in der kein Umschlag nach rot

feststellbar war (pH kleiner 8,4) betrug durchschnittlich 8 mm. Diese Zone ist auf die Carbonatisierung der Proben vor der Einlagerung in die korrosive Flüssigkeit zurückzuführen. Eine Verbreiterung der neutralisierten Zone innerhalb der Probenbereiche die in die Flüssigkeit eintauchten oder die nach Beendigung der Versuche oberflächlich angelöst waren, konnte nicht beobachtet werden. Dies zeigt, daß der festgestellte lösende Angriff bis zum Ende der Versuche nicht zu einem Abbau des Calciumhydroxids im nichtcarbonatisierten Bereich der Proben, also in einer Tiefe größer 8 mm, geführt hat.

8.2. Änderungen des Phasenbestandes

Um eventuelle Veränderungen des Phasenbestandes während der Korrosionsversuche zu erkennen, bzw. neugebildete Substanzen zu identifizieren wurden die Proben mit Hilfe der Röntgenphasenanalyse (XRD) und der Differentialthermoanalyse/gravimetrie (DTA/TG) untersucht. Dazu wurden Bohrmehlproben aus 0-1 cm Tiefe mit Hilfe eines Bohrhammers entnommen. Pro Probe wurden ca. 5 Bohrlöcher mit 11 mm Durchmesser eingebracht und das Material vermischt, um eine möglichst repräsentative Pulverprobe zu erhalten. Weiterhin wurden Proben der auf den Oberflächen der Prüfkörper aufgewachsenen Schichten und Proben der entstandenen Bodenkörper entnommen.

8.2.1. Untersuchungen mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie

Das Prinzip der Röntgenpulverdiffraktometrie besteht darin, daß bei der Beugung von monochromatischen Röntgenstrahlen an den Netzebenen von Kristallen eine substanzspezifische Verteilung von Beugungsmaxima in Abhängigkeit vom Beugungswinkel $2\text{-}\theta$ meßbar ist, die zur qualitativen und quantitativen Phasenanalyse herangezogen werden kann. Mit dieser Methode sind also nur kristalline bzw. teilkristalline Stoffe zu untersuchen. Die Tabellen 6 und 7 geben einen Überblick über die mit XRD festgestellten Veränderung der Proben. Alle Analysen wurden mit Kupferstrahlung durchgeführt.

Tabelle 6: Neubildungen nach Untersuchungen mit dem Röntgenpulverdiffraktometer nach 6 Monaten Einlagerungsdauer.

Lösung	Probe	Temperatur 3,5°C	Temperatur 35°C
Lö2	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	keine Veränderung	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$? und Gips ?
	Neubildungen auf der Oberfläche	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und etwas weniger Gips	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und etwas weniger Gips
	Bodensatz	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und Gips	
Lö4	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	keine Veränderung
	Neubildungen auf der Oberfläche	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$
	Bodensatz	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	
Lö4 10 bar	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	keine Veränderung	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$
	Neubildungen auf der Oberfläche	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$

Tabelle 7: Neubildungen nach Untersuchungen mit dem Röntgenpulverdiffraktometer nach 12 Monaten Einlagerungsdauer.

Lösung	Probe	Temperatur 3,5°C	Temperatur 35°C
Lö2	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O} ?$	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O} ?$
	Neubildungen auf der Oberfläche	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und wenig Gips	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und etwas weniger Gips
	Bodensatz	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und Gips	$(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2$ $(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und etwas mehr Gips
Lö4	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	keine Veränderung
	Neubildungen auf der Oberfläche	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$
	Bodensatz	?? sehr wenig $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$??
Lö4 10 bar	Pulver aus 0-1 cm Tiefe	keine Veränderung	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$
	Neubildungen auf der Oberfläche	$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$	

In den beiden Tabellen bedeutet ein Fragezeichen, daß die entsprechende Substanz nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden konnte, aber wahrscheinlich ist. Dies betrifft im wesentlichen die Substanz $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Deren Röntgenreflexe überlagern sich bei der Untersuchung von Betonproben stark mit den Reflexen einiger Phasen des Zuschlags (Feldspat, Montmorillonit), so daß ein sicherer Nachweis dieser Substanz in den Proben selbst nicht möglich war. Zwei Fragezeichen bedeuten, daß kristalline Substanzen vorhanden sind, die jedoch nicht identifiziert werden konnten.

Als wesentliche Neubildungen an der Oberfläche konnten das eben schon genannte Sulfat $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ sowie Gips bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 und die Substanz $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 identifiziert werden. Das letztgenannte Chlorid konnte auch in den ausgebohrten Betonproben sicher identifiziert werden. Die Abbildungen 11-14 im Anhang zeigen Röntgenbeugungsdiagramme von Oberflächenproben die im einen Fall aus $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ und Gips, im zweiten Fall aus $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ bestehen, sowie Röntgenbeugungsaufnahmen von Betonproben, die diese Substanzen mit großer Wahrscheinlichkeit enthalten.

Der Bodensatz der sich bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 bildete konnte nicht identifiziert werden. Es handelt sich um eine oder mehrere schlecht kristallisierte Substanzen, die nur sehr schwache und relativ breite Röntgenreflexe ergeben. Es handelt sich dabei jedoch eindeutig in der Hauptmasse nicht um $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$, das nur in Spuren vorhanden ist. Dies spiegelt die Konzentrationsgradienten in der Lösung wieder, die nicht umgewälzt wurde. Die Konzentrationen direkt an der Probenoberfläche sind nicht die gleichen wie in Bodennähe. Die Röntgenbeugungsdiagramme des Bodensatzes, der sich bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 bei 3,5 bzw. 35°C bildete stehen ebenfalls im Anhang unter den Nummer 15+16.

8.2.2. Untersuchungen mit dem Verfahren der Differentialthermoanalyse/gravimetrie

Bei der Differentialthermoanalyse/-gravimetrie (DTA/TG) wird das Gewicht einer Probe, die Änderung des Gewichts mit der Zeit, sowie die Temperaturdifferenz zwischen der Probe und einer inerten Referenzprobe während eines Aufheiz- oder Abkühlzykluses bestimmt. Dabei kann einerseits die Aufnahme bzw.

die Abgabe gasförmiger Substanzen in Abhängigkeit von der Temperatur durch die Gewichtsänderung der Probe gemessen werden. Andererseits können Reaktionsenthalpien chemischer Reaktionen durch die Temperaturdifferenz gegenüber einer Inertsubstanz in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen werden. Die Abbildungen 17-20 im Anhang zeigen die DTA/TG-Diagramme der ausgebohrten Betonproben aus 0-1 cm Tiefe nach 12 Monaten Einlagerungsdauer. Alle Analysen wurden mit einem Gerät STA 409 der Firma Netzsch durchgeführt. Die Versuche wurden in Luft mit Al_2O_3 -Tiegeln ausgeführt. Als Referenz wurde ebenfalls Al_2O_3 benutzt. Die Aufheizrate betrug 10 K/min. Es wurde jeweils 150 mg Bohrmehl untersucht. Tabelle 8 zeigt, welche Veränderungen gegenüber der bei 35°C wassergelagerten Probe im DTG/TG-Diagramm zu erkennen waren.

Tabelle 8: Veränderungen des DTA/TG-Diagramms der korrodierten Proben im Vergleich mit der Probe die bei 35°C wassergelagert wurde.

Temperatur in °C	80	120	240	280	380
Zusätzliche Peaks				Lö4 3,5°C	Lö4 3,5°C Lö4 35°C Lö4 3,5°C 10bar Lö4 35°C 10bar Lö2 3,5°C Lö2 35°C
Fehlende Peaks	Lö4 35°C	Lö4 35°C 10bar	Was. 3,5°C Lö4 35°C 10bar Lö4 35°C Lö2 3,5°C Lö2 35°C		
Temperatur in °C	450	560	640	780	840 (nur DTA)
Zusätzliche Peaks	Lö4 35°C	Lö2 35°C			
Fehlende Peaks			Lö4 35°C 10bar	Lö4 35°C Lö2 35°C	
Stärkere Peaks				Lö4 3,5°C	
Schwächere Peaks			Lö4 3,5°C	Was. 3,5°C	Lö4 3,5°C Lö4 35°C

Die Probe die in der Flüssigkeit Lö4 bei 3,5°C und 10 bar Druck eingelagert war, zeigt ab ca. 200°C ein völlig abweichendes DTA/TG-Diagramm. Nach 6-monatiger Beaufschlagungszeit konnten ähnliche Veränderungen beobachtet werden. Trotz dieser sehr deutlich feststellbaren Unterschiede zwischen den einzelnen Proben gestaltet sich eine Interpretation der Ergebnisse sehr schwierig. Von den Substanzen, die sich auf der Oberfläche der Proben bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 bildeten und dem Bodensatz der sich in der Flüssigkeit Lö4 bei 3,5 und 35°C bildete, wurden ebenfalls Analysen durchgeführt. Die entsprechenden DTA/TG-Diagramme finden sich ebenfalls im Anhang in den Abbildungen 21-22. Die Substanz, die von der Oberfläche der in der Flüssigkeit Lö4 eingelagerten Proben abgekratzt werden konnte, zeigt drei Peaks bei ca. 130°C, 300°C und 600°C, sowie zwei exotherme Peaks ohne erkennbare Gewichtsveränderung bei 440°C und 840°C. Der Bodensatz der Flüssigkeit Lö4 zeigt bei der Versuchstemperatur von 3,5°C Peaks bei 130°C, 420°C, 620°C, sowie einen sehr starken Peak bei 200°C. Bei der Versuchstemperatur 35°C sind Peaks bei 140°C, 180°C, 240°C, 300°C, 440°C und 600°C zu erkennen. Ein entsprechendes Diagramm von $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ zusammen mit Gips, wurde bereits in /1/ aufgenommen. Dieses Gemisch bildete sich auf der Oberfläche der in der Flüssigkeit Lö2 eingelagerten Proben. Das entsprechende Diagramm zeigte zwei endothermen Peaks bei ca. 140°C und ca. 230°C.

Der Vergleich der Analysen zeigt, daß nur der Peak bei 280°C, der in der Betonprobe bei Einlagerung bei 3,5°C in die Flüssigkeit Lö4 zu sehen ist, eventuell von der Substanz herührt, die auf der Oberfläche dieser Proben zu finden war. Die anderen Veränderungen lassen sich nicht über die Substanzen erklären, die sich auch auf den Oberflächen der jeweiligen Proben befanden. Die Zuordnung der beobachteten neuen oder verschwundenen Peaks zu definierten Reaktionen ist deshalb kaum möglich. Wir beschränken uns deshalb auf den Calciumhydroxidpeak bei ca. 460°C und den breiten Peak im Bereich von 550 - 750°C, der bei der Carbonatisierung entsteht. Sowohl das Calciumhydroxid als auch das Calciumcarbonat, das bei der Carbonatisierung entsteht, unterliegen einem relativ schnellen Abbau im Falle eines lösenden Angriffs. Die einzige Probe, die eine deutliche Veränderung des Calciumhydroxidpeaks zeigte ist die, die in der Flüssigkeit Lö4 bei 35°C eingelagert war. Hier zeigte sich zwischen 380 und 500°C ein neuer, sehr breiter Peak, in dem der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Peak wenn, dann nur noch als Andeutung zu sehen ist. Der Calciumcarbonatpeak bei 550-750°C zeigt ebenfalls die stärkste Abschwächung bei Einlagerung in Lö4 bei 35°C, wobei allerdings das Diagramm der Probe Lö4 3,5°C 10bar kaum auszuwerten

ist. Die Ergebnisse der Analysen spiegeln damit den lösenden Angriff auf die Proben bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 wieder, der besonders bei der größeren Temperatur ausgeprägt ist. Eine weitergehende Interpretation der Diagramme war jedoch im Rahmen dieses Projektes nicht möglich.

8.3. Untersuchungen der Porenradienverteilung

Bei der Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) wird Quecksilber, das mineralische Oberflächen nicht benetzt, unter Druck in das Porensystem des Baustoffes hineingedrückt. Über die Oberflächenspannung des Quecksilbers und den Benetzungswinkel mit dem zu untersuchenden Werkstoff kann der jeweilige Porenradius berechnet werden, in die das Quecksilber unter Aufbringung eines definierten Druckes hineingepresst wird /11/. Über das eingepresste Volumen als Funktion des Druckes kann eine Porenradienverteilung aufgestellt werden.

Untersucht wurden Oberflächenbereiche der beaufschlagten Betonproben (0-1 cm Tiefe) sowohl nach 6-monatiger, als auch nach 12-monatiger Beaufschlagung. Im Anhang sind in den Diagrammen 23-25 die entsprechenden Kurven nach 12-monatiger Beaufschlagung dargestellt. Die Porenradienverteilungen der Proben die in die Flüssigkeit Lö2 eingelagert waren zeigen kaum Unterschiede gegenüber der Probe die in Wasser bei 35°C eingelagert wurde. Die Proben, die in die Flüssigkeit Lö4 eingelagert wurden, zeigen eine ähnliche Porenradienverteilung wie die Proben die in Wasser bei 3,5°C eingelagert waren. Diese unterschiedliche charakteristische Form der Porenradienverteilung konnte auch nach 6-monatiger Einlagerungsdauer beobachtet werden. Da in diesem Fall jeweils andere Probenscheiben untersucht wurden, scheint es sich dabei um ein signifikantes Merkmal zu handeln. Außerdem kann man eine leichte Zunahme der Poren um 0,1 Mikrometer in der in der Flüssigkeit Lö4 bei 35°C gelagerten Probe gegenüber der wassergelagerten Probe vermuten, beweisbar ist dies nicht.

Vergleicht man die Porenradienverteilungen nach 6 und 12-monatiger Einlagerungsdauer miteinander, kann man eine leichte Abnahme der Poren um 0,01 Mikrometer im Falle der in Lö2 eingelagerten Proben beobachten. Diese Proben zeigten zusammen mit der Probe, die in Wasser bei 35°C eingelagert war eine Zunahme der Poren am unteren Messbereich der Apparatur. Die Proben die in Wasser bei 3,5°C bzw. in der Flüssigkeit Lö 4 bei 35°C gelagert wurden, zeigten keine sichtbare Veränderung der Porenradienverteilung als Funktion der

Einlagerungsdauer. Bei der Probe die in der Flüssigkeit Lö4 bei 3,5°C gelagert wurde kann man eine Abnahme der Poren um 0,02 Mikrometer und eine Vergrößerung der Poren um 0,1 Mikrometer vermuten. Zusammenfassend ist zu sagen, daß es wohl einige charakteristische Unterschiede in den Porenradienverteilungen nach Einlagerung in die Flüssigkeiten Lö2 und Lö4 gibt. Auf einen chemischen Angriff sind diese Unterschiede aber sicherlich nicht zurückzuführen, da sie sich auch in den in Wasser gelagerten Proben jeweils bei 35°C bzw. 3,5°C zeigen.

8.4. Untersuchung der Stahlbewehrung auf Korrosion

Nach 12-monatiger Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 und in Trinkwasser wurde der Korrosionszustand des Bewehrungsstahles in den entsprechend präparierten Proben untersucht. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die einzelnen Stähle in ihrer entsprechenden Lage in den Zylindern, sowie die am stärksten korrodierten Stähle. Die Zylinderhöhe betrug 20 cm. Die Flüssigkeiten konnten wegen der seitlichen Abdichtung nur von unten, unidirektional in die Proben eindringen. Korrosionserscheinungen am Rand der Stähle sind sicherlich auf eine nicht genügende seitliche Abdichtung der Proben zurückzuführen. Läßt man diese Korrosionserscheinungen am Rand der Stähle außer Betracht, kann man keinen eindeutigen Unterschied im Korrosionszustand der Bewehrung bei Wasserlagerung bzw. Lagerung in der Flüssigkeit Lö4 erkennen.

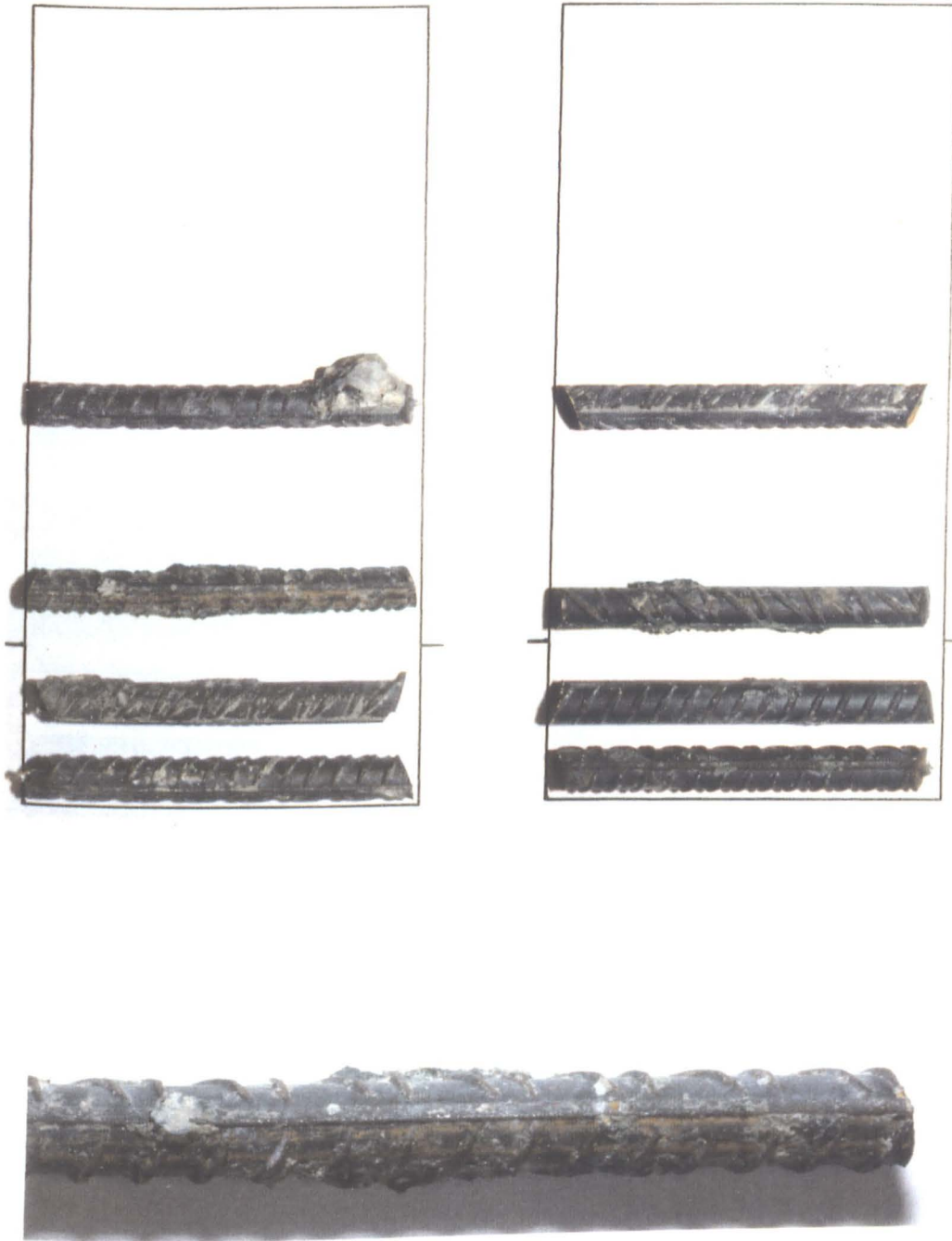


Abbildung 3: Korrosionszustand der Bewehrung nach 12-monatiger Einlagerung der Proben in Trinkwasser. Links: 3,5°C, rechts: 35°C, unten: Stab mit stärksten Korrosionserscheinungen.

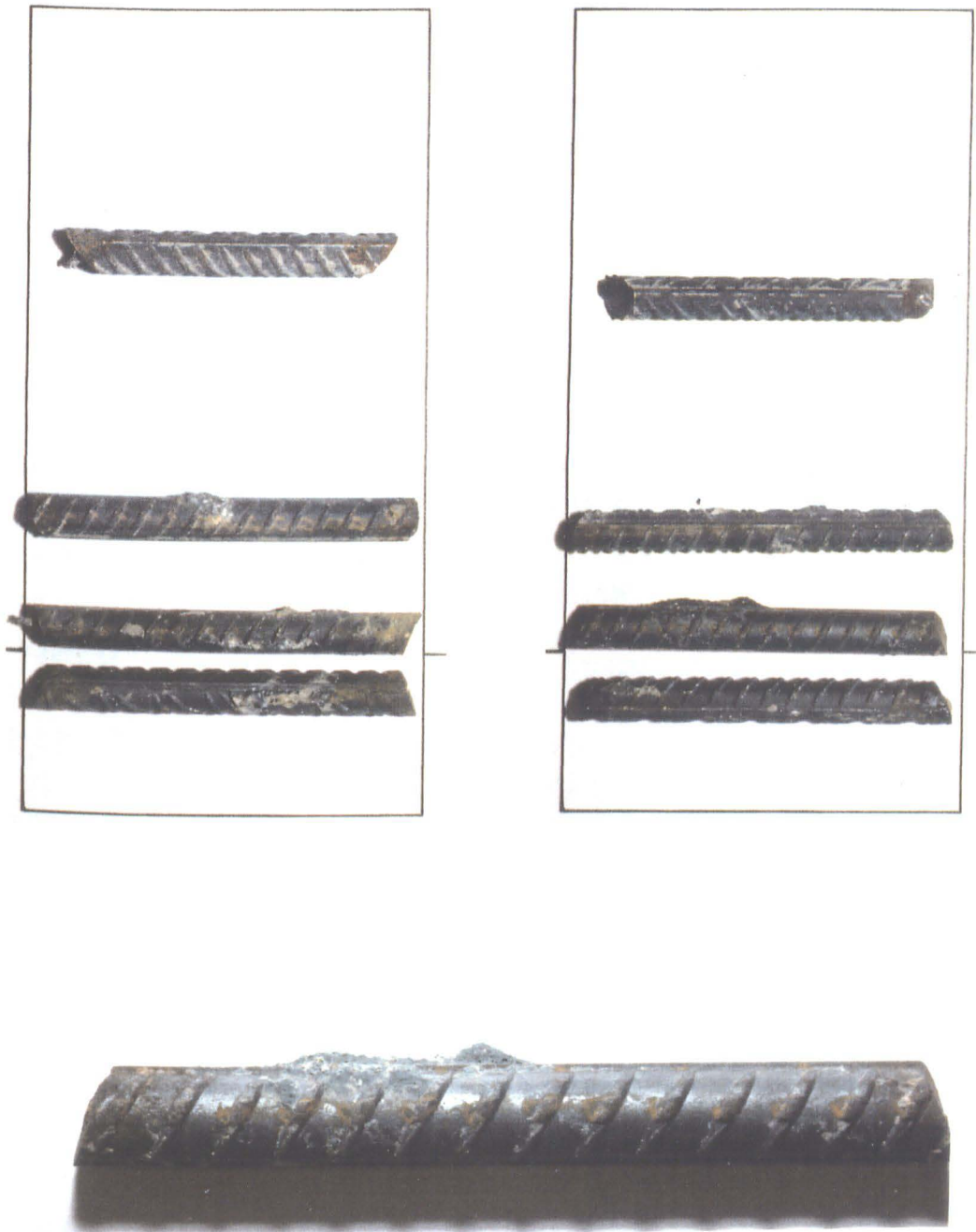


Abbildung 4: Korrosionszustand der Bewehrung nach 12-monatiger Einlagerung der Proben in die Flüssigkeit Lö4. Links: 3,5°C, rechts: 35°C, unten: Stab mit stärksten Korrosionserscheinungen.

8.5. Chemische Analysen

Nach 6- bzw. 12-monatiger Einlagerungsdauer wurden die Chlorid- und Zinkkonzentrationen in den Proben untersucht. Das Eindringen von Chlorid in Beton spielt eine große Rolle für die Korrosionsgefährdung der Bewehrung. Zink wurde als eines der Schwermetalle analysiert, die in der basischen Betonporenlösung schwerlösliche Verbindungen bilden, und damit porenverstopfend wirken können. Für diese Untersuchungen wurden nicht nur Pulverproben aus 0-1 cm Tiefe erbohrt, sondern in einzelnen Fällen auch Pulver aus 2-3 cm Tiefe entnommen. Dazu wurde das Material aus mehreren Bohrlöchern, Durchmesser 11 mm, wieder vermischt, um eine repräsentative Probe zu erhalten. Die Analyse zur Zinkbestimmung wurde in heißer Salzsäure aufgeschlossen. Die Analyse wurde mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) durchgeführt. Die Proben zur Chloridbestimmung wurden mit heißer Salpetersäure aufgeschlossen. Chlorid wurde durch Titration mit Silbernitrat bestimmt. Über die bekannte Mischungszusammensetzung des Betons wurden die Konzentrationen auf Masseprozent, bezogen auf den Zementgehalt umgerechnet. Tabelle 9 zeigt die beobachteten Chlorid- und Zinkkonzentrationen.

Tabelle 9: Konzentrationen von Chlorid und Zink in den Proben nach der Beaufschlagung (Fortsetzung nächste Seite).

Beaufschlagungszeitraum 6 Monate

Flüssigkeit	T in °C	Tiefe in cm	Chlorid Masse % Beton	Chlorid Masse % Zement	Zink Masse % Beton	Zink Masse % Zement
Wasser	35	0-1	0,016	0,106	0,0032	0,0212
Lö2	35	0-1	0,21	1,39	0,38	2,52
Lö4	35	0-1	0,45	2,99	0,36	2,39
Lö4 10 bar	35	0-1	0,39	2,59	0,83	5,51
Wasser	3,5	0-1	0,011	0,073	0,013	0,086
Lö2	3,5	0-1	0,098	0,651	0,0095	0,0631
Lö4	3,5	0-1	0,36	2,39	0,72	4,78
Lö4 10 bar	3,5	0-1	0,39	1,92	0,83	3,52

Beaufschlagungszeitraum 12 Monate

Flüssig- keit	T in °C	Tiefe in cm	Chlorid Masse % Beton	Chlorid Masse % Zement	Zink Masse % Beton	Zink Masse % Zement
Wasser	35	0-1	0,027	0,179	0,017	0,113
Lö2	35	0-1	0,37	2,46	0,38	2,52
Lö4	35	0-1	1,11	7,37	1,10	7,30
Lö4 10 bar	35	0-1	0,45	2,99	0,74	4,91
Lö4	35	2-3	0,50	3,32	0,30	1,99
Wasser	3,5	0-1	0,017	0,113	0,017	0,113
Lö2	3,5	0-1	0,12	0,80	0,39	2,59
Lö4	3,5	0-1	0,37	2,46	0,58	3,85
Lö4 10 bar	3,5	0-1	0,45	2,99	1,10	7,30
Lö4	3,5	2-3	0,13	0,86	0,21	1,39

Man erkennt zunächst, daß die Chloridgehalte in den Betonproben mit fortlaufender Beaufschlagungsdauer zunehmen. Die Zunahme im Zeitraum zwischen 6 und 12 Monaten ist in den meisten Fällen deutlich geringer als in den ersten 6 Monaten der Beaufschlagung. Eine extreme Ausnahme bildet die Probe die bei 35°C drucklos in der Flüssigkeit Lö4 eingelagert war. In diesem Fall ist im Zeitraum zwischen 6 und 12 Monaten Beaufschlagungsdauer eine erhebliche Zunahme der Chloridkonzentration im Beton zu erkennen. Ebenfalls erkennbar ist eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Chlorideindringens, was aus der Theorie auch zu erwarten ist. Bei fast allen Proben ist nach einer Beaufschlagung bei 35°C eine wesentlich größere Chloridkonzentration messbar wie nach Beaufschlagung bei 3,5 °C.

Alle analysierten Betone bis auf die wassergelagerten Proben zeigten in einer Tiefe von 0-1 cm Chloridgehalte, die den sogenannten kritischen Chloridgehalt z.T. weit überschreiten. Oft wird mit einem kritischen Chloridgehalt von 0,4 Prozent vom Zementgewicht gearbeitet. Der genaue Chloridgehalt, überhalb dessen eine Korrosion des Bewehrungsstahls möglich ist, ist jedoch eine Funktion

der Betongüte, der Zementart, der Carbonatisierung, der Luftfeuchte usw.. Ein Überblick über diese Zusammenhänge kann z.B. aus /12/ entnommen werden.

Für die in einer Ringschachtdeponie vorliegenden Bedingungen: dauerhaft hohe Luftfeuchte im Porenraum des Betons durch die Bodenfeuchte, niedrige Sauerstoffgehalte, qualitativ hochwertiger Beton, Beton aus Hochofenzement der einen großen elektrolytischen Widerstand besitzt, ist sicherlich mit einem großen kritischen Chloridgehalt zu rechnen. Wie groß er sein wird, läßt sich zur Zeit nicht mit Sicherheit sagen. Die gemessenen Chloridgehalte liegen jedoch zum Teil wesentlich über den bekannten Werten. Dies gilt besonders in den Fällen, wo eine hohe Temperatur und ein gleichzeitig ablaufender lösender Angriff das Eindringen von Chlorid erleichtern. In diesem Fall konnten auch in 2-3 cm Tiefe noch über 3 Masse % Chlorid analysiert werden. Vor dem Hintergrund dieser Werte ist es erstaunlich, daß kein Unterschied im Korrosionszustand der Bewehrung bei Einlagerung der Proben in die Flüssigkeit Lö4 bzw. bei Einlagerung in Wasser beobachtet werden konnte.

Bei der Interpretation dieser Werte muß man jedoch vorsichtig sein. Die Angaben zum kritischen Chloridgehalt gehen davon aus, daß eindringendes Chlorid lediglich durch die Reaktion mit dem Zementstein gebunden wird, sei es durch Bildung von Friedelschem Salz, oder durch Immobilisierung des Chlorids durch Adsorption an den Porenwandungen. Die Bildung anderer schwerlöslicher Chloride ist dabei nicht berücksichtigt. Dies ist aber, wie die Röntgenbeugungsuntersuchungen gezeigt haben, genau hier der Fall. Chlorid wird in Form von $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ gebunden, das in kristalliner Form im Porenraum des Betons vorliegt. Zwar können die gemessenen Chloridkonzentrationen nicht allein über die Bildung von $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ erklärt werden, dazu reichen die vorhandenen Zinkkonzentrationen nicht aus. Die Bildung anderer basischer Schwermetallchloride ist aber möglich. Dieses gebundene Chlorid ist für die Stahlkorrosion nicht von Bedeutung, wird aber bei der Chloridbestimmung mitanalysiert. Lediglich das Chlorid, das in ionarer Form in der Porenflüssigkeit gelöst ist, kann die Passivschicht der Stahlbewehrung schädigen. Wie groß dieser Wert ist, läßt sich aus den gemessenen Chloridanalysen nicht ableiten. Im Grunde genommen sind diese Chloridanalysen also wertlos. Die Zugrundelegung von Chloridanalysen zur Beurteilung der Korrosionsgefährdung von Betonbewehrung in Kontakt mit Deponiesickerwässern ist sehr problematisch.

Im Falle des Zinks ist weder eine eindeutige Abhängigkeit der Konzentrationen von der Beaufschlagungsdauer, noch von der Temperatur festzustellen.

Zur weiteren Interpretation der gemessenen Werte ist es wie in /1/ auch hier nützlich ein einfaches Modell heranzuziehen. Nimmt man an, daß der gesamte Porenraum des Betons mit der Lösung 4 gefüllt ist, dann würde der Beton bei unveränderter Gesamtporosität ca. 1 Masseprozent bezogen auf den Zementgehalt an Chlorid und etwa 0,09 % Zink enthalten. Die darüber liegenden Konzentrationen müssen damit erklärt werden, daß Chlorid bzw. Zink in der Zementsteinstruktur gebunden wird oder in Form von schwerlöslichen Salzen ausfällt. Eine weitere Erklärung ist, daß der Porenraum während des lösenden Angriffs durch die Flüssigkeit Lö4 ansteigt und dementsprechend mehr Lösung pro Volumeneinheit Platz finden kann. Es besteht die Möglichkeit, daß sich die Ausfällung schwerlöslicher Salze, die offensichtlich auch im Falle des lösenden Angriffs durch die Flüssigkeit Lö4 vorliegt, durch die Verstopfung von Poren günstig auf den Verlauf des lösenden Angriffs auswirken kann.

8.6. Axiale Zugfestigkeit der korrodierten Proben

Nach der korrosiven Beaufschlagung wurden die Zylinderproben zur Prüfung der axialen Zugfestigkeit herangezogen. Es handelt sich hier um Proben die durch die teilweise Einlagerung in die korrosive Flüssigkeiten bezüglich ihrer Festigkeitseigenschaften inhomogen geworden sind. Bei der Prüfung der axialen Zugfestigkeit reißen die Proben an der Stelle, die durch den korrosiven Prozess am stärksten geschädigt wurde, so daß man die Festigkeit der am stärksten korrodierten Probenschicht mißt. Druckfestigkeitsprüfungen sind bei chemisch inhomogen Proben sehr viel schwerer zu interpretieren.

Die Proben wurden direkt nach dem Ende der Beaufschlagung in Folie eingeschlagen. Sie wurden an den Endflächen leicht angeschliffen, um parallele und ebene Flächen zu erhalten. Die folgenden Abbildungen 5 und 6 zeigen die erreichten Festigkeiten nach 6 bzw. 12-monatiger Beaufschlagung. Es wurden jeweils Doppelbestimmungen durchgeführt.

Man erkennt deutlich einen Festigkeitsabfall der Proben, die bei 35°C in der Flüssigkeit Lö4 eingelagert waren, gegenüber den entsprechenden wassergelagerten Proben. Dieser Abfall der axialen Zugfestigkeit nimmt deutlich mit der Einlagerungsdauer zu. Bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 bei einer Temperatur von 3,5°C ist ein solcher Abfall nicht zu erkennen, auch nicht bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2.

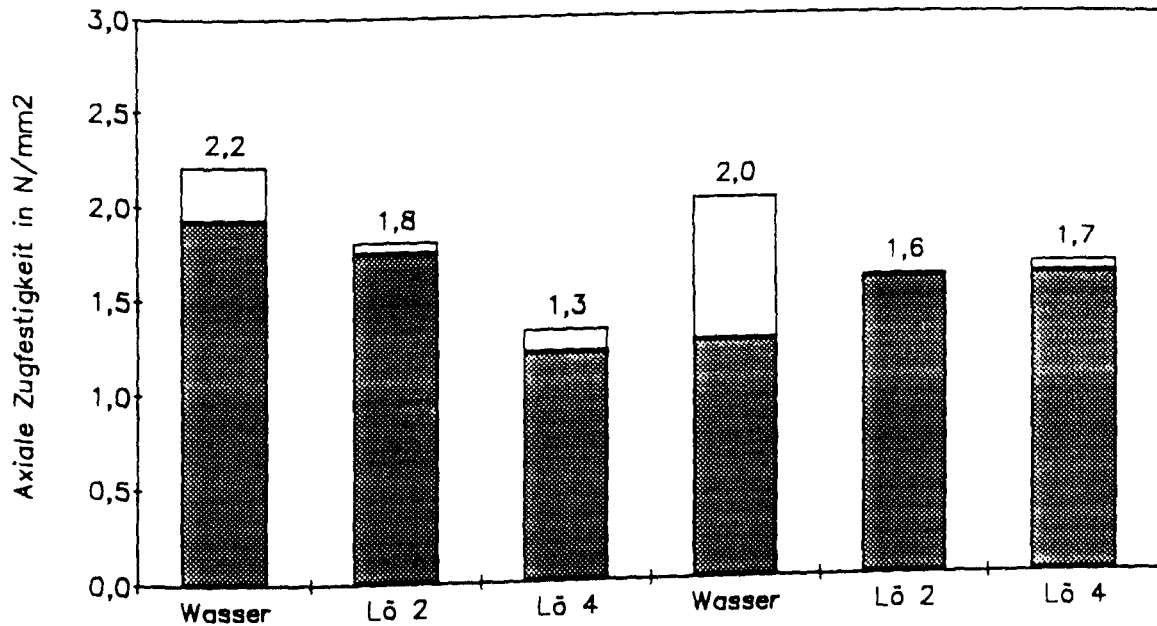


Abbildung 5: Axiale Zugfestigkeiten der korrodierten Proben in N/mm^2 nach 6-monatiger Beaufschlagung. Linke Balken: Lagerung bei 35°C , rechte Balken: Lagerung bei $3,5^\circ\text{C}$. Dargestellt sind die Werte der Doppelmessungen, bezeichnet wurde der gemessene Maximalwert.

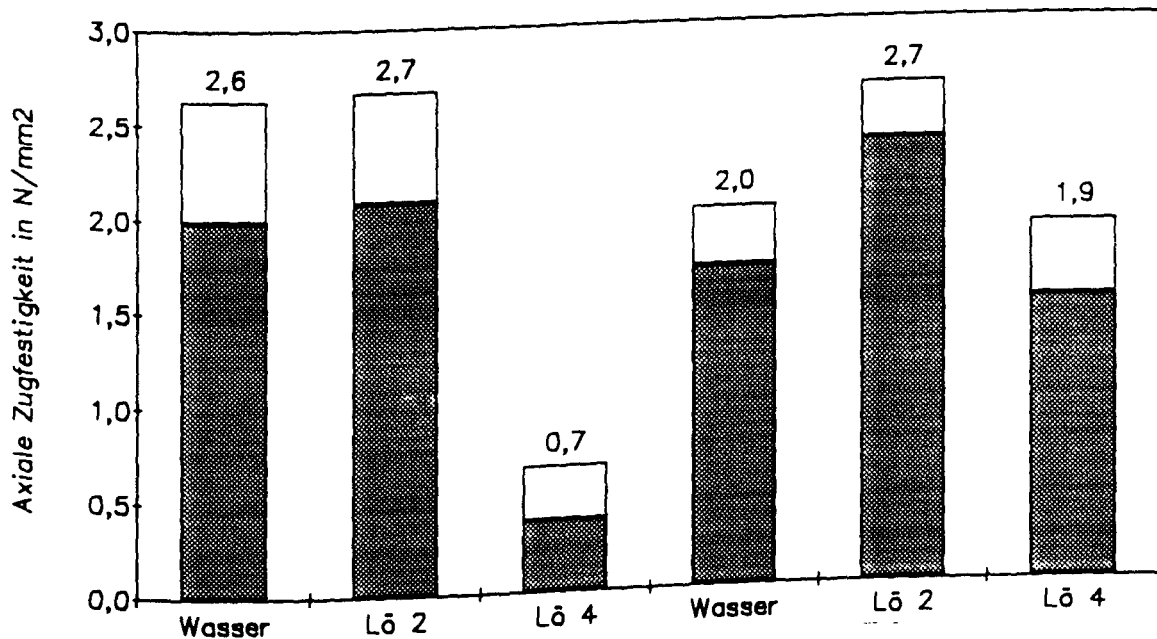


Abbildung 6: Axiale Zugfestigkeiten der korrodierten Proben in N/mm^2 nach 12-monatiger Beaufschlagung. Linke Balken: Lagerung bei 35°C , rechte Balken: Lagerung bei $3,5^\circ\text{C}$. Dargestellt sind die Werte der Doppelmessungen, bezeichnet wurde der gemessene Maximalwert.

8.7. Veränderungen der Sauerstoffpermeabilität

Nach dem Ende der Beaufschlagung und einer Trocknung von mindestens 28 Tagen bei 20°C und 65 r.F. wurden alle Proben erneut auf ihre Sauerstoffpermeabilität untersucht. Die Veränderungen sind in den folgenden Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Aufgetragen wurde der Quotient aus den Permeabilitätskoeffizienten k der beaufschlagten Proben und den entsprechenden Koeffizienten der unbeaufschlagten Proben als Funktion des Einlagerungsmediums.

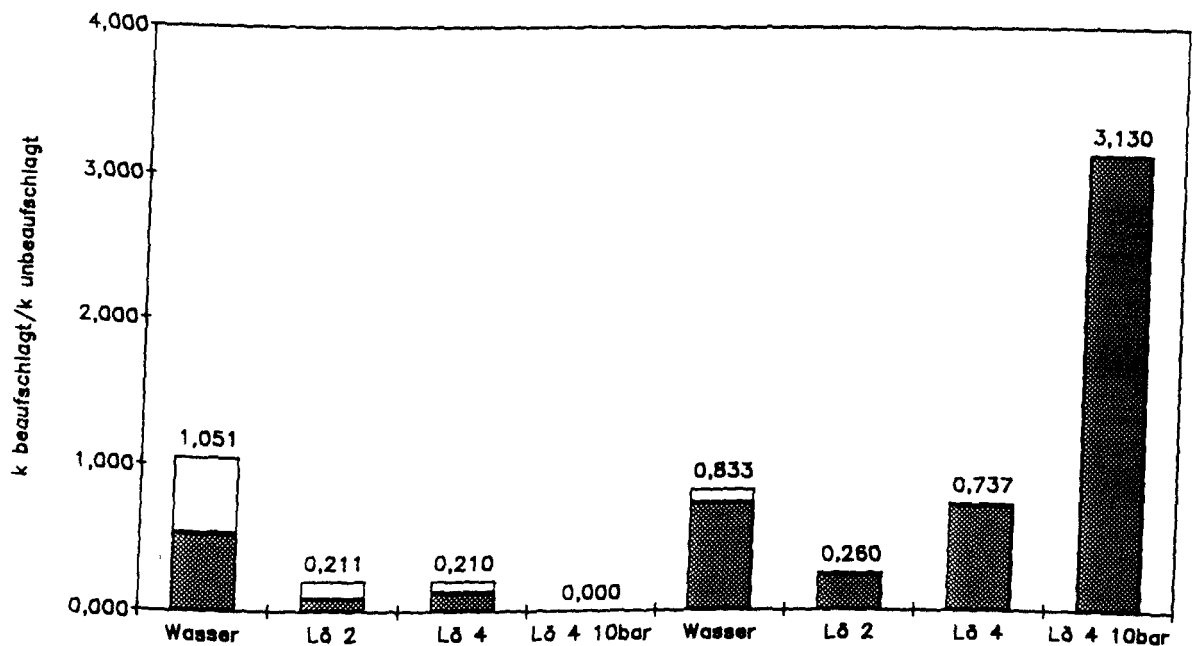


Abbildung 7: Veränderung der Sauerstoffpermeabilität der beaufschlagten Proben nach 6 Monaten Einlagerungsdauer. Linke Balken: Lagerung bei 35°C, rechte Balken: Lagerung bei 3,5°C. Dargestellt sind die Werte der Doppelmessungen, bezeichnet wurde der gemessene Maximalwert.

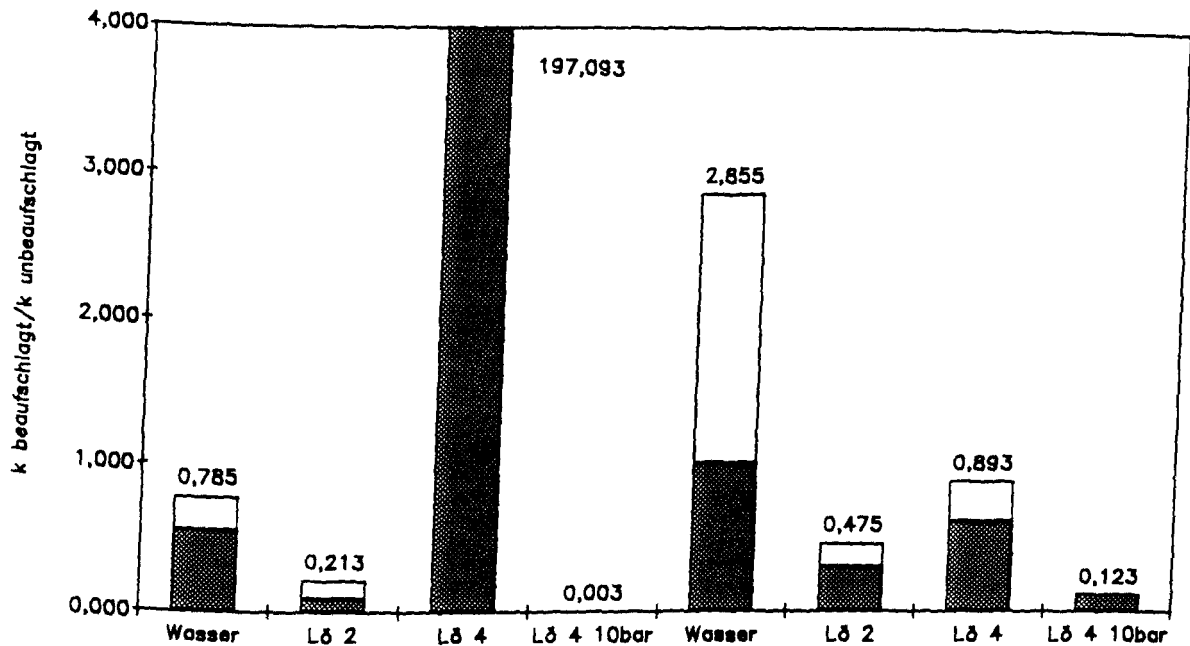


Abbildung 8: Veränderung der Sauerstoffpermeabilität der beaufschlagten Proben nach 12 Monaten Einlagerungsdauer. Linke Balken: Lagerung bei 35°C, rechte Balken: Lagerung bei 3,5°C. Dargestellt sind die Werte der Doppelmessungen, bezeichnet wurde der gemessene Maximalwert.

Man erkennt zunächst, daß die Sauerstoffpermeabilität durch eine Wasserlagerung der Proben kaum verändert wurde. Bei Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2 ist eine leichte Abnahme der Sauerstoffpermeabilität zu erkennen. Dies kann durch die Ausfällung schwerlöslicher Phasen im Porenraum der Proben erklärt werden, die nicht treibend wirken müssen. Eine dieser Phasen ist mit großer Wahrscheinlichkeit das auch auf der Oberfläche dieser Proben kristallisierende Magnesium-Mangan-Zink-Hydroxid-Sulfat-Hydrat, das mittels Röntgenpulverdiffraktometrie an der Probenoberfläche nachgewiesen werden konnte. Diese Beobachtungen entsprechen den Ergebnissen aus /1/.

Bei druckloser Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ4 bei 3,5°C konnte keine nennenswerte Veränderung der Sauerstoffpermeabilität beobachtet werden. Das Ergebniss bei Druckbeaufschlagung ist uneinheitlich. Sehr auffällig ist die Veränderung der Sauerstoffpermeabilität bei Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ4 bei 35°C. Nach 6 Monaten Beaufschlagungszeit ist eine Abnahme zu erkennen,

obwohl die Probenoberfläche schon einen lösenden Angriff zeigt. Nach 12 Monaten Beaufschlagungszeit ist dann eine ganz erhebliche Zunahme der Sauerstoffpermeabilität zu beobachten. Bei Druckbeaufschlagung unter einem Druck von 10 bar ist eine solche Zunahme der Sauerstoffpermeabilität nicht zu beobachten. Im Gegenteil, diese Proben zeigen die stärkste Abnahme der Permeabilität überhaupt. Ein größerer Wassergehalt der Proben bei der Messung infolge verzögerter Austrocknung kommt nicht in Frage, da diese Proben auch nach längerer Trocknungszeit keine wesentlich größere Sauerstoffpermeabilität erreichten. Eine Erklärung für das Verhalten der Proben, die bei 35°C in die Flüssigkeit Lö4 eingelagert waren und für die Diskrepanz zwischen den gemessenen Werten der drucklos- bzw. druckbeaufschlagten Proben kann z.Zt. nicht gegeben werden. Der Anstieg der Sauerstoffpermeabilität der Proben die 12 Monate bei 35°C in die Flüssigkeit Lö4 eingelagert waren ist sicherlich im Zusammenhang mit dem lösenden Angriff zu sehen. Warum nach 6 Monaten ein Abfall zu beobachten war, ist unklar.

9. Diskussion

Aufgabe dieser Forschungsarbeit war, anhand von zeitraffenden Korrosionsversuchen eine Aussage darüber zu erarbeiten, welche Lebensdauer für Betonbauteile in der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen prognostiziert werden kann. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Beton in Kontakt mit Deponiesickerwasser bzw. durch den Abfallkörper aufsteigendem Grundwasser steht.

Aus den zu erwartenden und auch beobachteten korrosiven Veränderungen an den untersuchten Betonproben ergibt sich, daß für den Baustoff Beton in Kontakt mit Deponiesickerwässern aufgrund der in jedem Fall zu erwartenden chemischen Reaktionen keine Lebensdauer über Jahrhunderte oder gar geologische Zeiträume prognostiziert werden kann. Solange in einer Deponie Sickerwässer entstehen, kann es nur um die Frage gehen, ob der Beton über eine begrenzte Zeit diesem Angriff widersteht oder nicht. Bei der Planung der Deponieerweiterung Hoheneggelsen wird dem Beton keinerlei dichtende Wirkung mehr zugeschrieben. Der Beton ist also lediglich für die Tragfähigkeit des Bauwerkes während der Betriebsphase verantwortlich. Betrachtet man jetzt nicht nur den Spezialfall der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen, kann eine solche Betriebsdauer von einigen Jahren bis zu einigen Jahrzehnten dauern. Im folgenden sollen die ex-

perimentell gewonnen Daten miteinander verknüpft und der Versuch eine Prognose über einen solchen Zeitraum gemacht werden.

Die Thematik wird in die drei Abschnitte: Treibender Angriff, lösender Angriff und Korrosionsgefährdung der Bewehrung durch Chloridionen unterteilt. Diesen Überlegungen ist jedoch folgende Voraussetzung voranzustellen:

Die hier beschriebenen Versuche wurden an Proben durchgeführt, die bei Versuchsbeginn eine nachweisbare Carbonatisierung aufwiesen. Dies gilt sicherlich auch für den größten Teil der Korrosionsversuche die in der Literatur beschrieben werden, auch wenn die daraus folgende Inhomogenität des Betons meistens nicht weiter beachtet wird. Solche Versuche entsprechen aber auch den realen Gegebenheiten der meisten Bauwerke. Auch bei einer Erweiterung der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen durch Ringschächte aus Beton wird der Beton bei der ersten Berührung mit Deponiesickerwasser eine carbonatisierte Randschicht aufweisen. Man prüft mit solchen Versuchen aber im Grunde genommen nicht die Korrosionsbeständigkeit des Betons, sondern im wesentlichen die Korrosionsbeständigkeit der carbonatisierten Randschicht. Ist der Korrosionswiderstand der carbonatisierten Randschicht größer als der des uncarbonatisierten Betons wäre bei einem Abtrag der Randschicht mit einer beschleunigten Korrosion zu rechnen. Dieser Frage soll jetzt kurz nachgegangen werden.

Der Korrosionswiderstand eines mineralischen Stoffes wird von zwei Merkmalen geprägt, nämlich vom der chemischen Beständigkeit des Materials an sich, und der Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe durch das Porensystem des Materials.

An Zementsteinen die aus Hochofenzement hergestellt wurden, konnte festgestellt werden, daß bei einer Carbonatisierung eine Strukturvergrößerung auftritt. Damit verbunden ist eine Vergrößerung des Permeabilitätskoeffizienten für Wasser bzw. für gasförmige Stoffe /6,13/. Für Proben aus Portlandzement gilt dies nicht. Für die hier durchgeführten Versuche mit einem Beton aus Hochofenzement bedeutet dies, daß die carbonatisierte Randzone dem Eindringen von Schadstoffen sicherlich weniger Widerstand entgegengesetzt hat, als der uncarbonatisierte Beton.

Es ist bekannt, daß teilweise carbonatisierte Betone einen höheren Widerstand gegenüber treibendem Angriff durch Sulfat aufweisen können. Bei auftretenden Dehnungen aufgrund eines treibenden Angriffs bleibt die carbonatisierte Randzone des Materials jedoch erhalten. Es besteht nicht die grundsätzliche Möglichkeit einer sprunghaft ansteigenden Korrosionsaktivität ab dem Zeitpunkt, an dem diese Schicht wegkorrodiert ist, wie dies z.B. während eines lösenden

Angriffs denkbar wäre. Wenn durch Treiben Risse entstanden sind, die carbonatisierte Randzone also durchbrochen ist, ist die Gebrauchsfähigkeit des Bauteils sowieso nicht mehr gegeben.

Die Beständigkeit der carbonatisierten Randschicht im Falle eines lösenden Angriffs schätzen wir nicht höher ein, als die des uncarbonatisierten Betons. Calciumcarbonat reagiert ähnlich empfindlich auf Säuren wie uncarbonatisierter Beton und reagiert ebenfalls mit austauschfähigen Salzen.

Wir gehen deshalb davon aus, daß bei einem eventuellen Abtrag der carbonatisierten Randzone des Betons nicht mit einer wesentlichen Beschleunigung der auftretenden Korrosionsprozesse zu rechnen ist. Eine solche Beobachtung ist aus der Literatur auch nicht bekannt.

Treibender Angriff

Weder in /1/ noch in den hier durchgeführten Experimenten konnten Risse beobachtet werden, die auf Treiberscheinungen hindeuten würden. Zwar ist bekannt, daß Treibprozesse sich oft erst nach langer Zeit bemerkbar machen, eine Zunahme der Festigkeit, wie sie in der ersten Zeit eines Sulfatangriffs jedoch oft auftritt /10/, war nicht zu beobachten. Ettringitneubildungen konnten nicht beobachtet werden. Auf der Oberfläche der in die Flüssigkeit LÖ2 eingelagerten Proben konnte die Neubildung von Gips beobachtet werden. Wahrscheinlich liegt dieser Gips auch im oberflächennahen Porenraum des Betons vor. Gips kann als treibende Phase wirken. Einige Autoren vermuten, daß Gips nur dann treibend wirken kann, wenn er in Folge einer topochemischen Reaktion gebildet wird /zitiert in 14/. Eine topochemische Reaktion liegt hier aber sicher nicht vor, da der Gips frei in den Raum hinaus kristallisiert. Dies spricht eher für die Kristallisation aus der Lösung. In einem solchen Fall können aber nur dann Spannungen aufgebaut werden, wenn durch Ungleichgewichtsprozesse z.B. schnelle Temperatur- oder Feuchtewechsel eine übersättigte Lösung entsteht, die dann spontan auskristallisiert. Solche Bedingungen sind an der freien Witterung denkbar. In 60 m Tiefe unter der Erdoberfläche laufen Feuchte- und Temperaturwechsel jedoch sehr langsam ab, so daß solche Prozesse nicht zu erwarten sind. Das gleiche gilt für die Bedingungen, unter denen die hier beschriebenen Versuche durchgeführt wurden. Analoge Überlegungen gelten auch für die analysierten Neubildungen $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ und $(\text{Mg},\text{Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Anzeichen für einen treibenden Angriff liegen also nicht vor, obwohl die Sulfatkonzentrationen der verwendeten Lösungen erheblich über den Grenzwerten der DIN 4030 lagen. Im Gegensatz zur DIN 4030 handelt es sich bei Deponie-

sickerwasser nicht um ein in großen Mengen vorhandenes, unmittelbar auf Beton einwirkendes Wasser, sondern um Wässer, die im Porenraum des Abfallkörpers vorliegen und sich bei einer regengeschützten Deponie auch nur langsam erneuern.

Über diese Punkte hinaus muß man betonen, daß sehr stark betonangreifende Sulfatkonzentrationen nach DIN 4030 in den Sickerwässern der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen die große Ausnahme darstellen. Die weitaus meisten Analysen liegen weit unter dem Grenzwert der DIN 4030. Es ist zu erwarten, daß sich dies auch in Zukunft nicht wesentlich ändert, da der maximale Sulfatgehalt in diesen Wässern durch die Bildung schwerlöslicher Sulfate begrenzt wird.

Lösender Angriff

Ein lösender Angriff auf die untersuchten Betonproben bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö4 war durch Betrachtung der Oberflächenstruktur der Proben, die Messung der Sauerstoffpermeabilität, die Messung der axialen Zugfestigkeit und ansatzweise auch durch DTA/TG-Analyse zu erkennen. Dieser Angriff ist im wesentlichen auf den Ammoniumgehalt der Lösung zurückzuführen. Bei der Interpretation der in dieser Forschungsarbeit gemessenen Zugfestigkeiten ist zu betonen, daß es sich lediglich um die axialen Zugfestigkeit der am stärksten korrodierten Betonzone handelt.

Bei den Korrosionsversuchen mit der Flüssigkeit Lö4 war ein sehr deutlicher Unterschied zwischen einer Beaufschlagung bei 3,5°C und 35°C zu beobachten. Während bei den bei 3,5°C beaufschlagten Proben keine signifikanten Abweichungen der Zugfestigkeit und der Sauerstoffpermeabilität von den Werten der wassergelagerten Proben zu beobachten war, tritt dieser Unterschied bei den Proben die bei 35°C beaufschlagt wurden gravierend hervor. Die Sauerstoffpermeabilität dieser Proben stieg nach 12-monatiger Beaufschlagung stark an, die axiale Zugfestigkeit sank stark ab. Der große Unterschied zwischen beiden Versuchen macht deutlich, welchen Einfluß die Temperatur auf einen Korrosionsprozess haben kann.

Wie in Kapitel 7 ausgeführt, entsprechen die wahren Temperaturverhältnisse in einer Sonderabfalldeponie eher den Versuchen bei 3,5°C, es sei denn, das Sickerwasser wird durch chemische Reaktionen im Deponiekörper erwärmt. Dies ist jedoch nur beim Abbau organischer Substanz zu erwarten, da sonstige Reaktionen bei denen größere Mengen Wärme frei wird durch die Einlagerungsbedingungen in der Regel ausgeschlossen werden.

Der Grenzwert für sehr starken chemischen Angriff durch Ammonium nach DIN 4030 von 100 mg/l ist nach neueren, 9-jährigen Untersuchungen durch Rechenberg und Sylla /15/ zu niedrig angesetzt. Sie empfehlen die Anhebung dieses Grenzwertes auf 300 mg/l NH_4^+ . Dieser Wert ist nur wenig kleiner als der Maximalwert, der nach den uns vorliegenden Analysen bislang in den Sickerwässern der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen gemessen wurde. Da eine Vergrößerung der Ammoniumkonzentration in den Sickerwässern in Zukunft nicht auszuschließen ist, ist es interessant die Abtragungsraten beim Angriff höher konzentrierter Ammoniumlösungen zu betrachten. Als Abtragungsrate wird hier die Dicke der Betonschicht verstanden, die nach dem korrosiven Angriff durch Abreiben mit einer Drahtbürste entfernt werden kann. Wir konnten während der hier durchgeführten Untersuchungen eine Abtragungsrate von maximal 0,8 mm nach einem Jahr in einer Lösung mit 6036 mg/l Ammonium messen. Laut der uns vorliegenden Literatur über den Angriff von Ammoniumlösungen auf Beton /z.B. 15,16,17/ ist nicht mit einer überlinearen Zunahme des korrosiven Einflusses von Ammoniumlösungen (Gewichtsverlust, Festigkeitsverlauf) mit der Zeit zu rechnen. Vielmehr ist in der Regel eine Abnahme der Korrosionsrate mit der Zeit zu beobachten, was zum Beispiel auf einen diffusionsgesteuerten Reaktionsmechanismus zurückgeführt wird. Die in diesem Forschungsprojekt gemessenen Abtragungsraten nach 6- bzw. 12-monatiger Einlagerungsdauer bestätigen dies. Es konnte keine signifikante Zunahme der Abtragung im Zeitraum zwischen 6 und 12 Monaten Einlagerungsdauer nachgewiesen werden. In einer Sonderabfalldeponie ist nicht mit einer Entfernung (mechanische Beschädigung) der sich bildenden Korrosionsschicht zu rechnen. Dies trägt ebenfalls zu einer Verlangsamung des Korrosionsprozesses bei. Setzt man also einem linearen Zusammenhang zwischen Abtragungsrate und Zeit voraus, liegt man auf der sicheren Seite. Die zu erwartende maximale Abtragungsrate von 0,8 mm/Jahr bei sehr ungünstigen Bedingungen ist in der Betriebsdauer einer Sonderabfalldeponie als unbedenklich anzusehen. Die Tragfähigkeit des Betons wird bei Wanddicken um einen Meter innerhalb solcher Zeiträume überhaupt nicht gefährdet. Auch eine Gefährdung der obersten Bewehrungslage ist erst nach Jahrzehnten zu erwarten.

Korrosionsgefährdung der Bewehrung durch Chloridionen

Mit Bewehrung versehene Proben wurden ein Jahr lang mit der Flüssigkeit L04 beaufschlagt. Eine, verglichen mit wassergelagerten Proben verstärkte Korrosion der Bewehrung, war auch bei einer Betondeckung von nur 1,5 cm nicht zu beobachten. Chloridanalysen der Betone geben in diesem Fall ein falsches Bild von der Korrosionsgefährdung der Bewehrung, da sich im Porenraum des Betons

Ausfällungen eines schwerlöslichen basischen Schwermetallchlorids bildeten. Eine Gefährdung der Bewehrung durch Chloridkorrosion ist damit innerhalb einer zu erwartenden Betriebsdauer einer Sonderabfalldeponie nicht zu erwarten, wenn eine genügende Betondeckung sichergestellt wird. Auf das Problem der Rißbreitenbeschränkung wird hier nicht eingegangen.

Zusammenfassung

Aus dem vorher gesagten schließen wir, daß eine Gefährdung von Betonbauteilen in der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen und vergleichbarer Deponien durch chemischen Angriff innerhalb einer normalen Betriebsdauer von einigen Jahren bis wenigen Jahrzehnten mit großer Sicherheit nicht zu erwarten ist, wenn ein Beton verwendet wird der ähnliche Eigenschaften aufweist wie der in diesem Forschungsprojekt untersuchte. Das gleiche gilt bezüglich einer Bewehrungskorrosion aufgrund gelöster Ionen.

Nach den bisher vorliegenden Sickerwasseranalysen der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen und ähnlicher Deponien ist in weiten Bereichen solcher Bauwerke nicht mit einer Betonkorrosion zu rechnen. Eine Korrosion wird in solchen Bereichen eintreten, in denen insbesondere mit hohen Ammoniumgehalten zu rechnen ist, sowie in Bereichen in denen aufgrund chemischer oder biologischer Aktivität warme Sickerwässer auftreten. Die in diesen Bereichen zu erwartende Betonkorrosion wird jedoch mit großer Sicherheit innerhalb der Nutzungsdauer keine Gefahr für die Tragfähigkeit der Konstruktion darstellen.

10. LITERATUR

- /1/ Schmidt, F.; Rostásy, F.S.; Budelmann, H.: Entwicklung und Erprobung von Rezepturen für extrem dichten und dauerhaften Beton für Bauwerke für den Gewässerschutz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben. Gefördert mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen (1992)
- /2/ Schmidt, F.: Dauerhafter Beton für Deponiebauwerke. Entwicklung und Erprobung verschiedener Rezepturen. In: Budelmann, H.: Technologie und Anwendung der Baustoffe. Festschrift F.S. Rostásy. Verlag Ernst und Sohn Berlin (1992)
- /3/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien. Müll Handbuch 4725, Lfg. 3/85, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- /4/ Die Zusammensetzung von Deponiesickerwässern. Arbeitsbericht der ATV Arbeitsgruppe 7.2.26 "Sickerwässer aus Industrie- und Sonderabfalldeponien". Korrespondenz Abwasser, Bd.35, H.1, S.82-87 (1988)
- /5/ Wischers, G.; Sprung, S.: Verbesserung des Sulfatwiderstandes von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche - Sachstandsbericht Mai 1989 -. Betontechnische Berichte, Beton, Nr.1, S.17-21, Nr.2, S. 62-66 (1990)
- /6/ Gräf, H.; Grube, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. Beton, Bd. 36, S.184-187 und S.222-226 (1986)
- /7/ Gräf, H.; Grube, H.: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit. Beton, Bd. 36, S.426-429 u. S.473-476, (1986)
- /8/ Brinkmann, R.: Allgemeine Geologie. Brinkmanns Abriss der Geologie Bd.1. 13 Aufl., Enke Verlag Stuttgart (1984)
- /9/ Horvath, A.L.: Handbook of aqueous electrolyte solutions. Ellis Horwood, Chichester (1985)
- /10/ Biczok, I.: Betonkorrosion, Betonschutz. 5. Aufl. Bauverlag, Wiesbaden (1968)
- /11/ Kordina, K.; Osteroth, H.H.; Schwick, W.: Schutz von Gewässern und Grundwasser durch dichte Betonbauteile. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig (1989)
- /12/ Comité Euro-International Du Béton (CEB): Durable concrete structures. Design guide. Thomas Telford Services Ltd., Sec. Ed. (1992)
- /13/ Bier, T.: Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Dissertation, Karlsruhe (1983)
- /14/ Cohen, M.D.; Bentur, A.: Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions. ACI Materials Journal, S. 148-157 (1988)

- /15/ Rechenberg, W.; Sylla, H.M.: Die Wirkung von Ammonium auf Beton. Beton, Heft 1, S. 26-31 (1993)
- /16/ Nägele, E.; Hillemeier, B.; Hilsdorf, H.K.: Der Angriff von Ammoniumsalzlösungen auf Beton. Betonwerk und Fertigteil-Technik, Heft 11, S. 742-751 (1984)
- /17/ Mauitzsch, M.: Zur Wirkung aggressiver Wässer auf Beton. Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung. Bd. 14, Nr.2, S.124-128 (1984)

- /N1/ DIN 4030. Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Teil 1 und 2, Juni 1991. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1991)
- /N2/ DIN 4710. Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauchs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen. Nov. 1982. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1982)

11. ANHANG

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der Deponiesickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen. Zum Vergleich Daten anderer Deponien.

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
ph Wert		4,5	12,5	3,5	11,6
Leitfähigkeit 1)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2600	17800	2000	100000
Abdampfrückstand	mg/l	2590	47800	300	50000
Glührückstand	mg/l	270	36900	800	20000
Säurekapazität	mmol/l		3,2	0	250
Basekapazität	mmol/l		845		
Ammonium	$\text{mg}/\text{l N}$	<0,04	446	<5	6036
Nitrit	$\text{mg}/\text{l N}$	<0,02	0,65	0	131
Nitrat	$\text{mg}/\text{l N}$	<0,5	10,4	0	14775
Gesamter Stickstoff	mg/l			5	4000
Gesamter Phosphor	mg/l			0,01	52
Sauerstoffgehalt	$\text{mg}/\text{l O}_2$	1	16,4	0	10
DOC (gel.org.Kohlenst.)	mg/l	14	10700	120	22000
Kaliumperman.verbr.	mg/l	82	1900	50	10000
CSB	mg/l	58,2	65500	50	60000
BSB5	$\text{mg O}_2/\text{l}$	<3	14600	<1	45000
Sulfidschwefel	$\text{mg}/\text{l S}$	<0,1	0,245		<0,2
Cyanid gesamt	mg/l	<0,04	36,7	0,0	15
Cyanid l. freisetzbar	mg/l	<0,02	0,08	0,0	1
Fluorid	mg/l	0,53	2500	<0,1	50
Gesamthärte	mmol/l	1,04	24,8	10,8	90
	$^\circ\text{dH}$	5,82	139	60	504
Calcium	mg/l	96	2590	30	2500
Kalkaggressive Kohlens.	mg/l			0	200
Magnesium	mg/l	0,662	1090	50	2000
Chlorid 1)	mg/l	111	13600	36	36146
Sulfat	mg/l	<0,5	12700	18	14968
Natrium	mg/l	126	10200	50	8200
Kalium	mg/l	29	1460	10	10000
Eisen 1)	mg/l	<0,1	2470	0,38	1000
Mangan	mg/l	<0,1	1900	1	75

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
Chrom 1)	mg/l	<0,01	236	<0,009	35
Kupfer	mg/l	<0,005	16,52	0,0013	8
Nickel	mg/l	0,03	7,34	0,0142	30
Zink	mg/l	0,002	2000	<0,05	27,242
Blei	mg/l	0,04	1,05	<0,1	1
Cadmium	mg/l	<0,001	37	0,001	2
Quecksilber	mg/l	<0,0006	0,045	0,00017	0,05
Antimon	mg/l	0,003	0,55		
Arsen	mg/l	<0,003	39	<0,0001	1
Barium	mg/l	8,74	177		
Bor	mg/l	0,1	30		
Kobalt	mg/l	<0,02	5		
Vanadium	mg/l	0,03	1,79		
AOX 1)	µg/l	0,00022	3600	44	36500
IR KW Heizöl	mg/l	<0,02	1		
IR KW Normalbenzin	mg/l	<0,02	1,75		
Summe PCB Isomere	µg/l	<0,06	0,27		
Summe PCB Chlophen	µg/l	<0,5	1,37		
Dichlormethan	µg/l	0,01	2370	64	36500
Trichlormethan	µg/l			1	710
Chloroform	µg/l	<0,001	600		
1,1,1 Trichlorethan	µg/l	0,0003	306	<0,4	1000
1,1,2 Trichlorethan	µg/l			<0,4	1000
Tetrachlormethan	µg/l	<0,0001	2	0,6	270
1,1,1,2 Tetrachlorethan	µg/l			<0,01	775
SBV	mval/l	2,9	134		
LBV	mval/l	0,5	328		
Sulfid H ₂ S	mg/l	<0,03	8,3		
Thiocyanat	mg/l	<0,2	3900		
Selen	mg/l	0,008	0,175		
Tellur	mg/l	<0,001	0,209		
Chrom 6-wertig	mg/l	<0,1	136	<4	290
1,2 Dichlorethan	µg/l	25	2460	0,02	1
Summe PAK	µg/l	0,05	8,91		

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
Trichlorethylen	µg/l	31	273	<0,01	775
1,2 Dichlorpropan	µg/l	<1	148		
Tetrachlorethylen	µg/l	14	100		
Perchlorethylen	µg/l			1	7430
1,2,3 Trichlorpropan	µg/l	<1	2160		
Benzol	µg/l	145	29200		
Toluol	µg/l	<1	15200		
Xylol	µg/l	28,7	5800		
1,4 Dichlorbenzol	µg/l	<1	426		
1,2 Dichlorbenzol	µg/l	<0,1	651		
Hexachlorbutadien	µg/l	<1	44		
Alpha HCH	µg/l	0,2	1300		
Beta HCH	µg/l	<0,1	1500		
Gamma HCH	µg/l	0,2	1200		
HCH Isomere	µg/l			0,0	0,1
Hexachlorbenzol	µg/l	<0,1	1400		
Aldrin	µg/l	<0,1	0,5		
Dieldrin	µg/l	<0,1	0,3		
4,4 DDE	µg/l	<0,1	1,3		
Methoxychlor	µg/l	<0,1	8,6		
Pentachlorphenol	µg/l	0,3	152		
2,4,5-T-säure u.-ester	µg/l	<0,2	346		
Summe Dichlorphenole	µg/l	3	181		
Summe Trichlorphenole	µg/l	2,5	192	0,001	1
Phenol Gesamt	mg/l			<0,01	350
Gesamtphenolindex	mg/l	<0,003	227		
2,4,5 Trichlorphenol	µg/l	0,5	128		
Schwefelwasserstoffe	mg/l	<0,05	36,5	0	80
Kohlenwasserstoffe 1)	mg/l	<0,1	84,6	<0,1	20
TOC (ges.org.Kohlenst.)	g/l	0,1	16,3	0,01	25

1) In "Altdeponien" Leitfähigkeiten bis 183000 µS/cm, Chlorid bis 126,3 g/l, Eisen bis 2,7 g/l, Chrom bis zu 300 mg/l, AOX bis 292 mg/l und Kohlenwasserstoffe bis 424 mg/l.

Apparatur zur Prüfung der Sauerstoffpermeabilität von Betonproben nach System VDZ

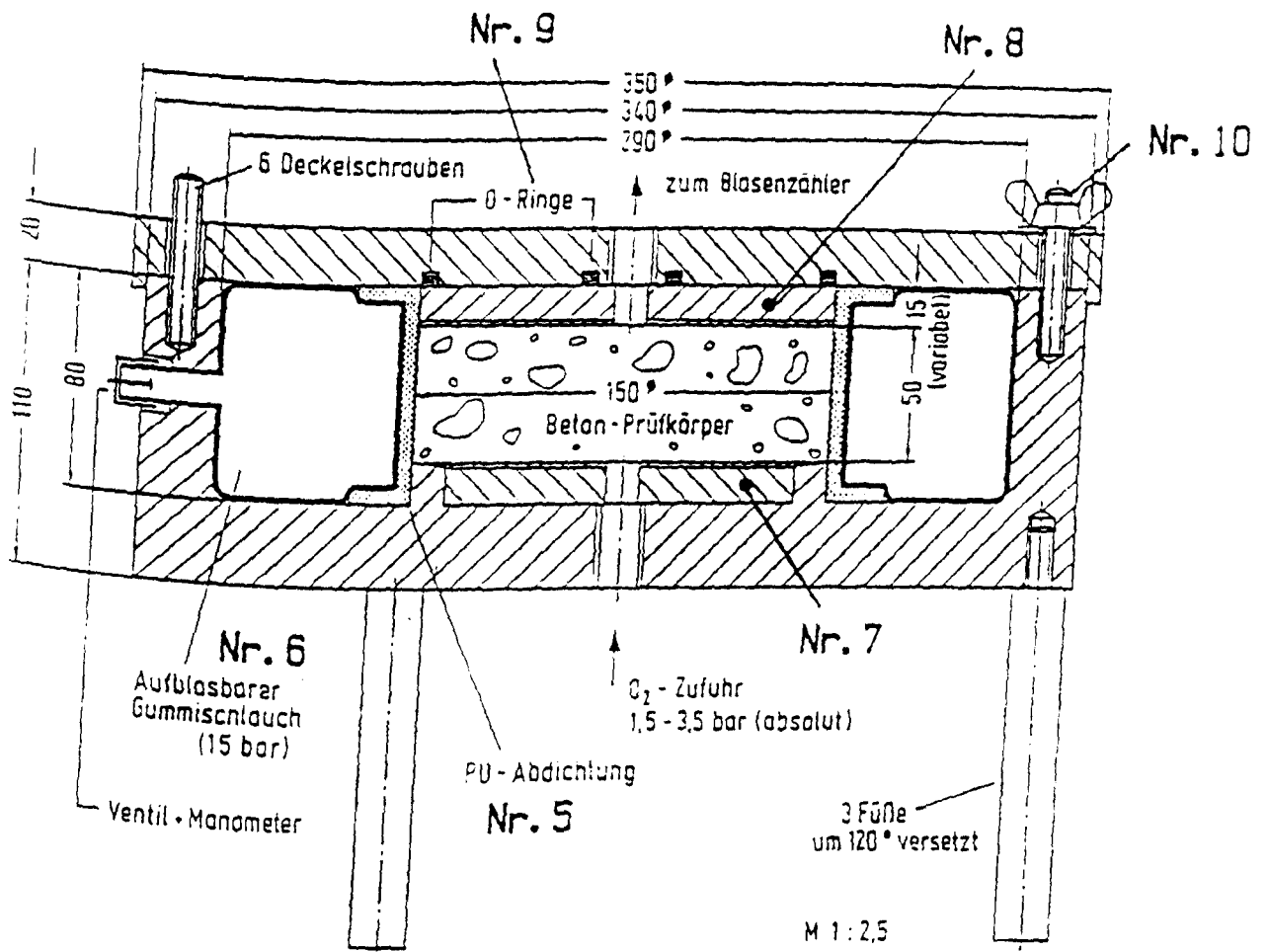


Abbildung 9: Schnittzeichnung der Apparatur zur Messung der Sauerstoffpermeabilität nach dem System VDZ.

Apparatur zur Beaufschlagung von Betonproben
mit aggressiven Flüssigkeiten bis
zu 10 bar Druck (Eigenbau iBMB)

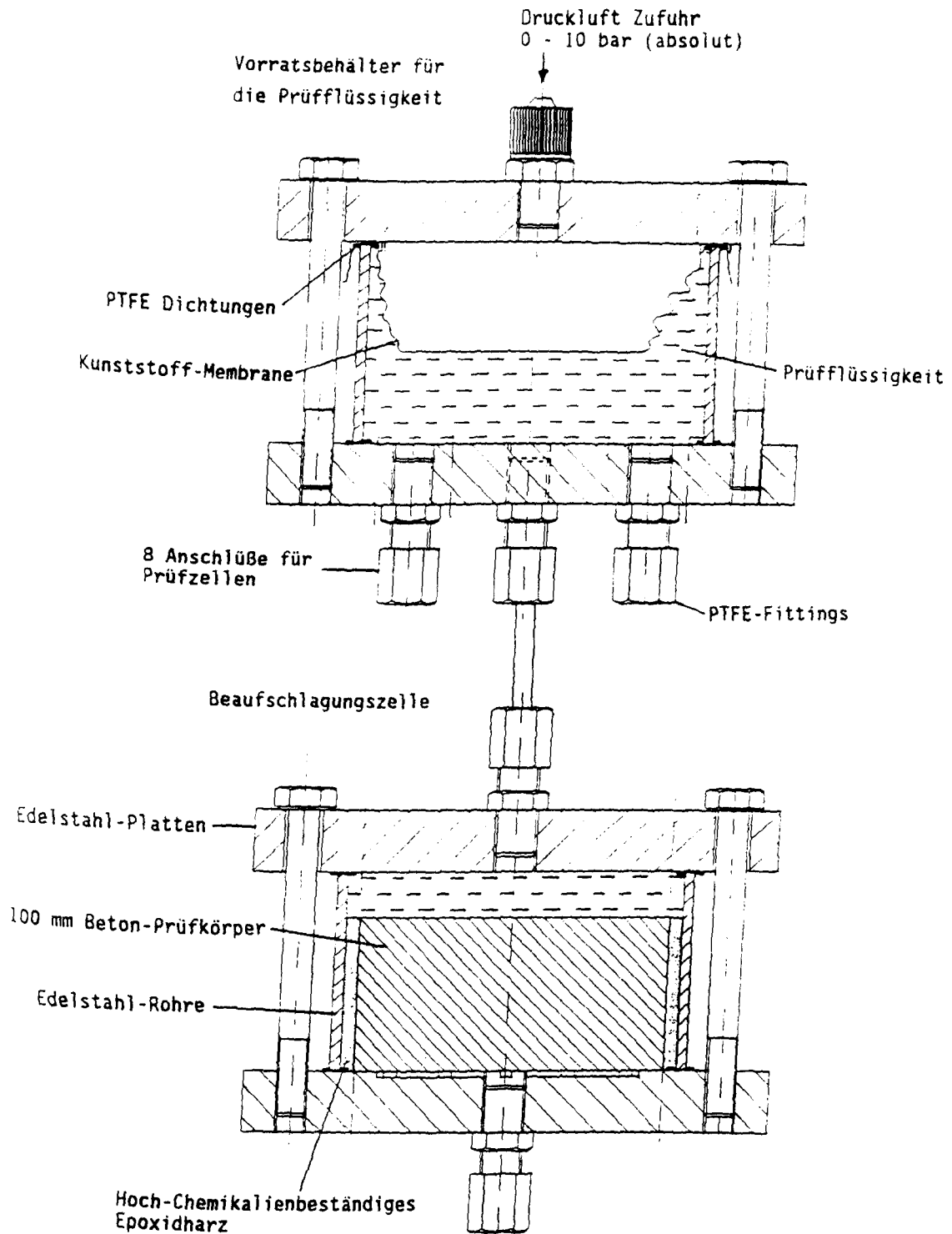


Abbildung 10: Druckapparatur zur Beaufschlagung mit der Flüssigkeit Lö4 unter
10 bar Druck.

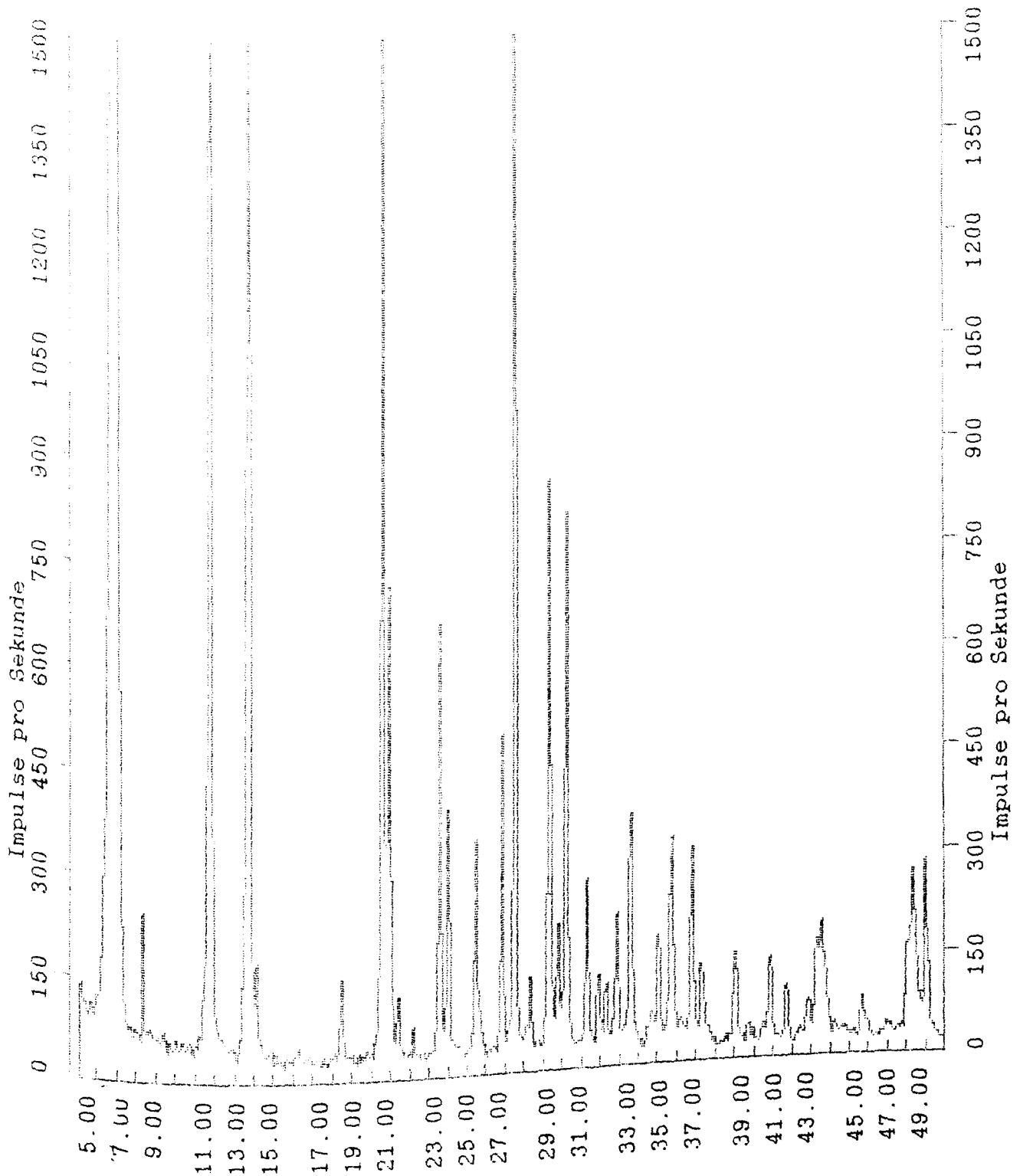


Abbildung 11: Röntgenbeugungsaufnahme von Kristallen, die von der Oberfläche einer Betonprobe abgenommen wurde, die 6 Monate bei 35°C in die Flüssigkeit einer Betonprobe abgenommen wurde, die 6 Monate bei 35°C in die Flüssigkeit einer Betonprobe abgenommen wurde, die 6 Monate bei 35°C in die Flüssigkeit einer Betonprobe abgenommen wurde. Das Diagramm zeigt im wesentlichen Reflexe von Gips und $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

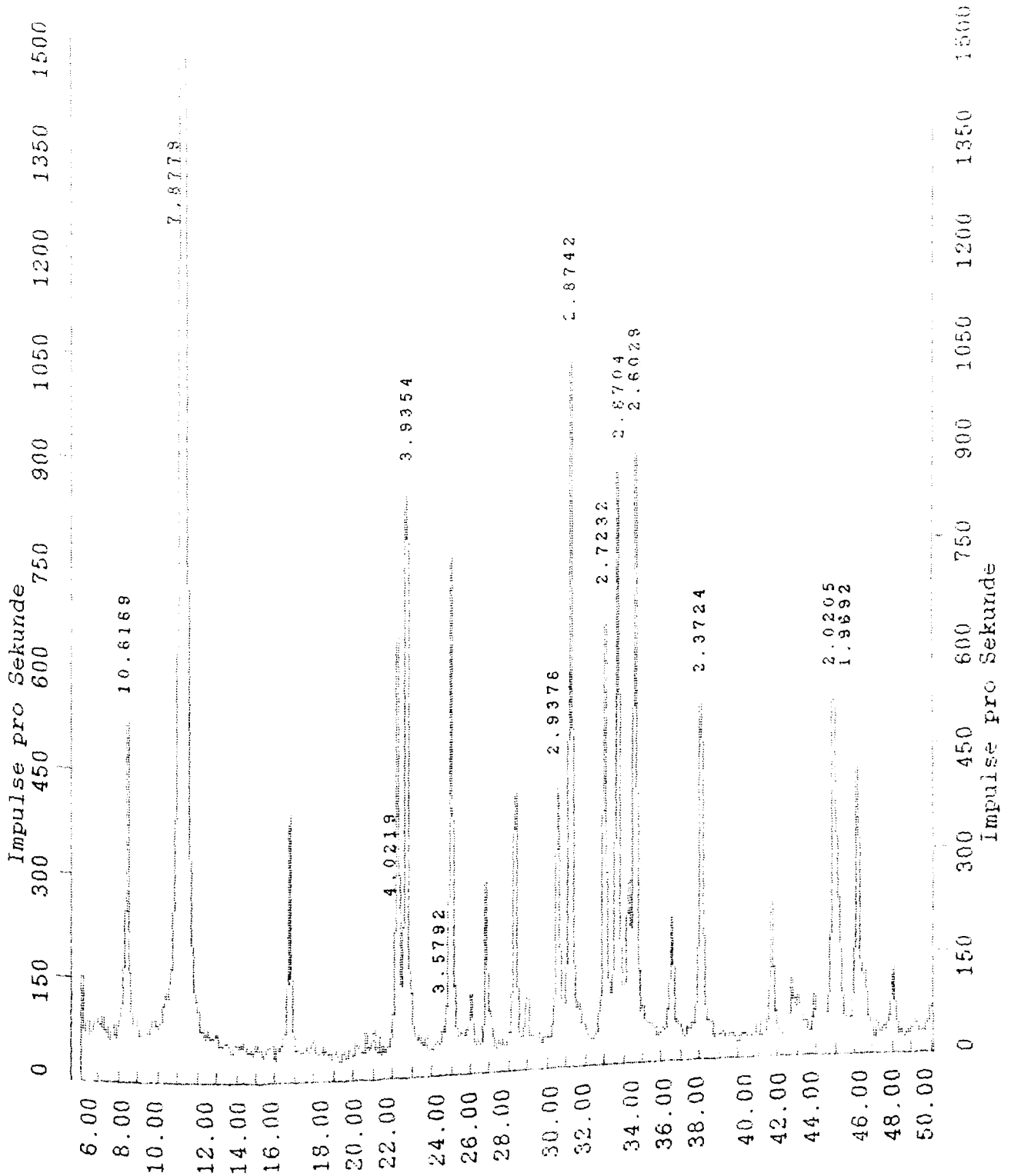


Abbildung 12: Röntgenbeugungsaufnahme von Kristallen, die von der Oberfläche einer Betonprobe abgenommen wurde, die 6 Monate bei 3,5°C in die Flüssigkeit einer Betonprobe eingelagert war. Das Diagramm zeigt im wesentlichen Reflexe von $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$.

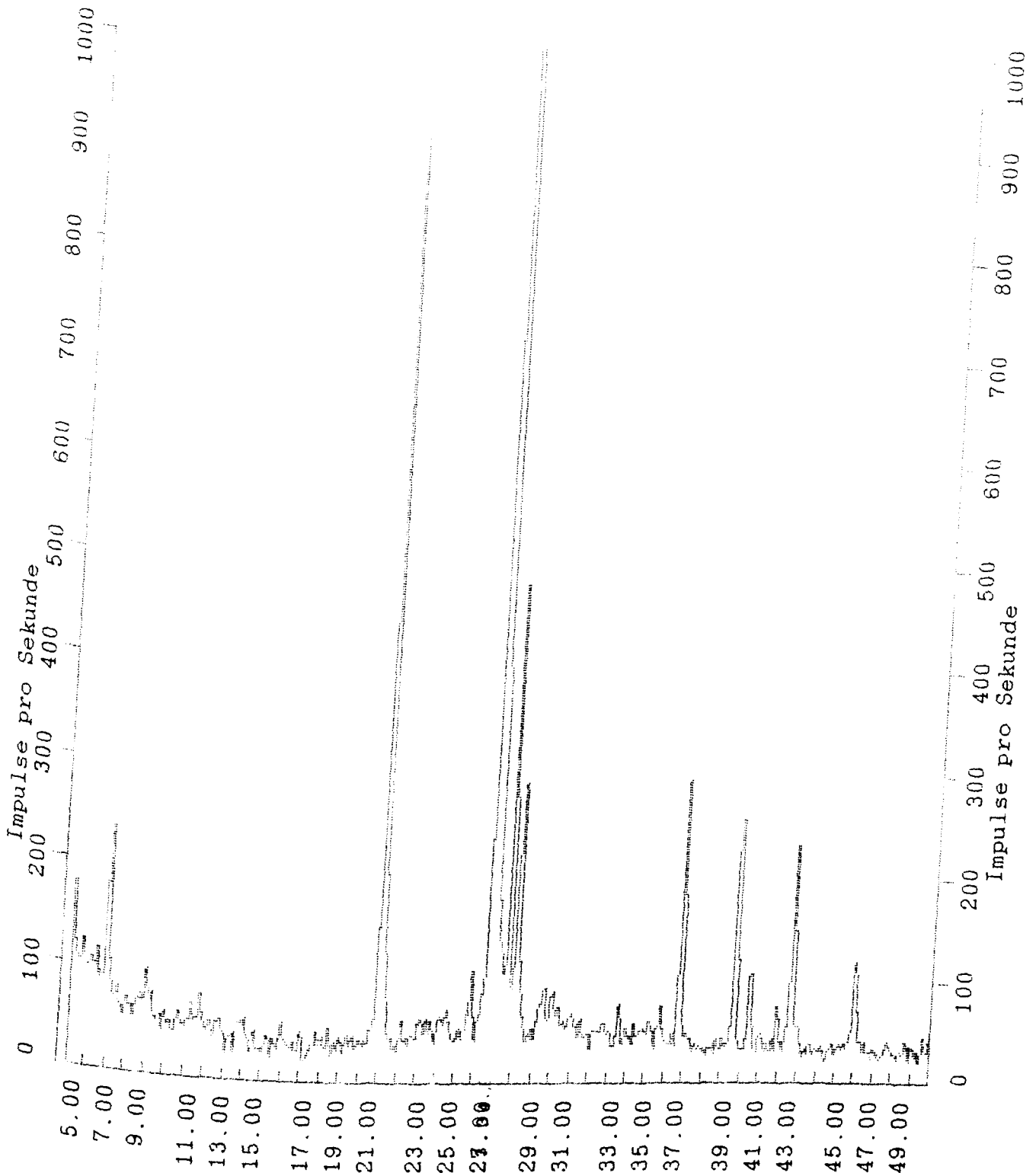


Abbildung 13: Röntgenbeugungsaufnahme einer Betonprobe (0-1 cm Tiefe) die 6 Monate bei 35°C in die Flüssigkeit LÖ2 eingelagert war. Das Diagramm zeigt neben den charakteristischen Reflexen eines Betons mit großer Wahrscheinlichkeit Reflexe von Gips und $(\text{Mg}, \text{Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

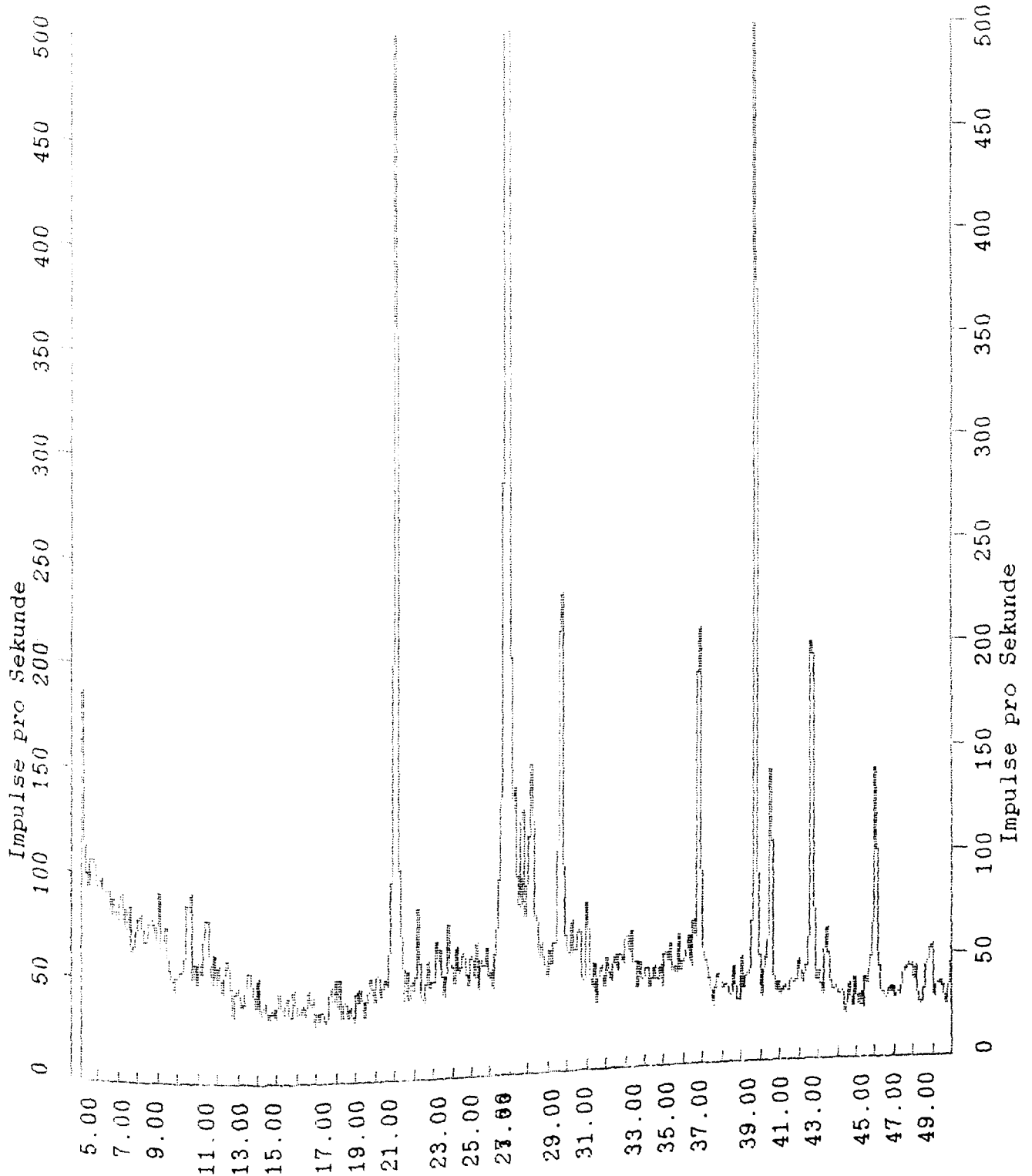
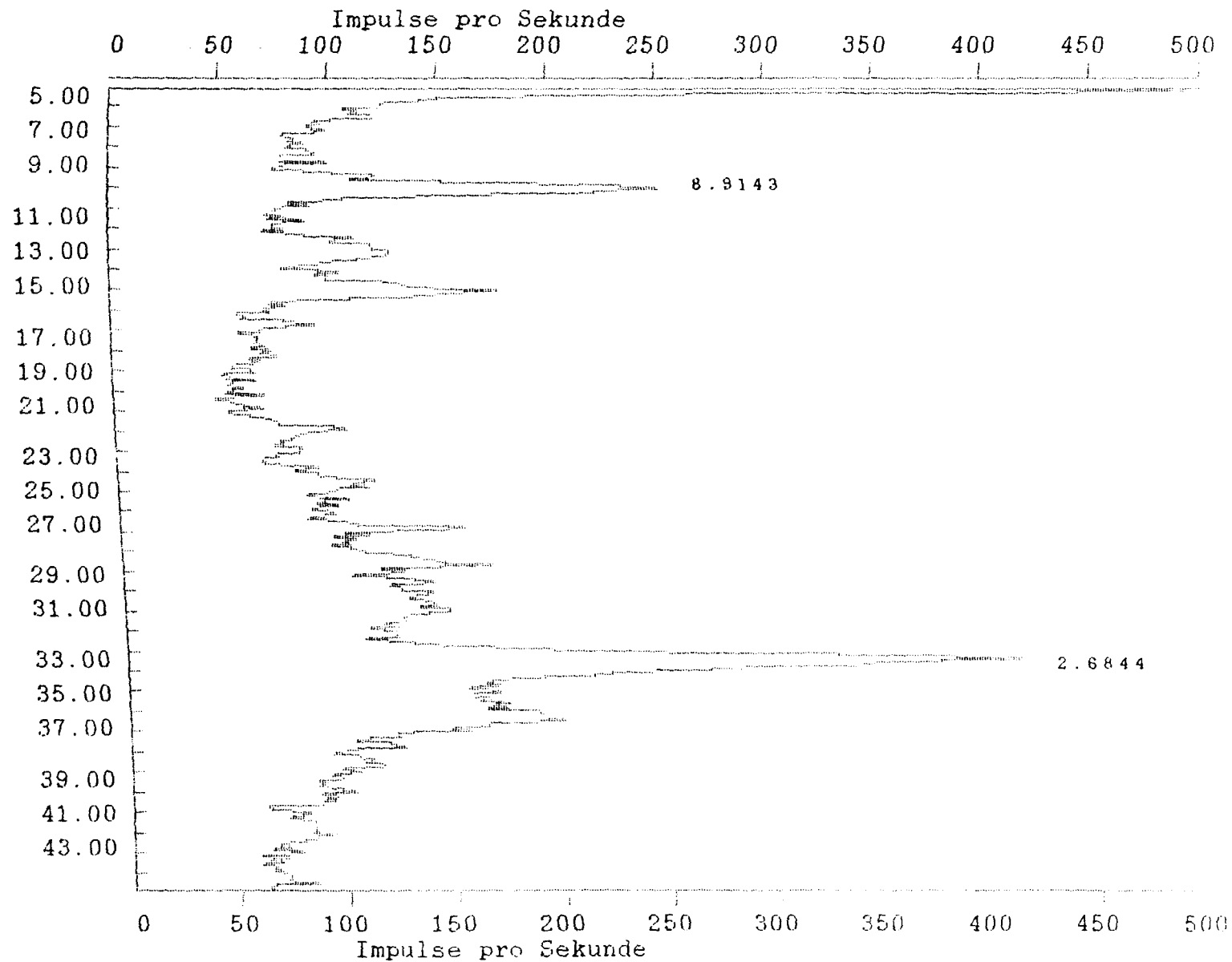


Abbildung 14: Röntgenbeugungsaufnahme einer Betonprobe (0-1 cm Tiefe) die 12 Monate bei 3,5°C in die Flüssigkeit LÖ4 eingelagert war. Das Diagramm zeigt neben den charakteristischen Reflexen eines Betons Reflexe von $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$.

Abbildung 15: Röntgenbeugungsaufnahme des Bodensatzes, der in der Flüssigkeit Löt bei 3,5°C nach 12 Monaten vorlag (Nicht identifiziert).



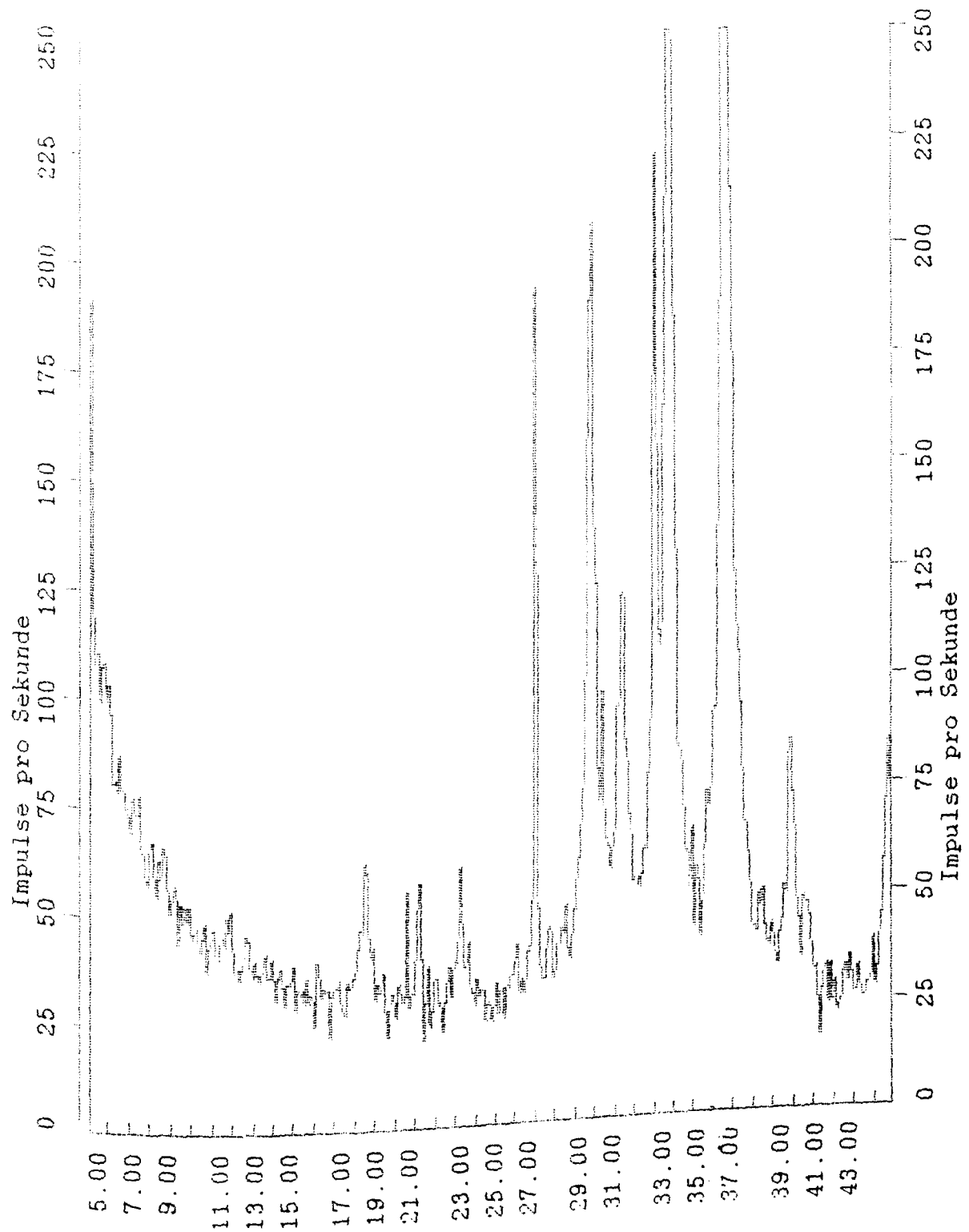


Abbildung 16: Röntgenbeugungsaufnahme des Bodensatzes, der in der Flüssigkeit Lö4 bei 35°C nach 12 Monaten vorlag (Nicht identifiziert).

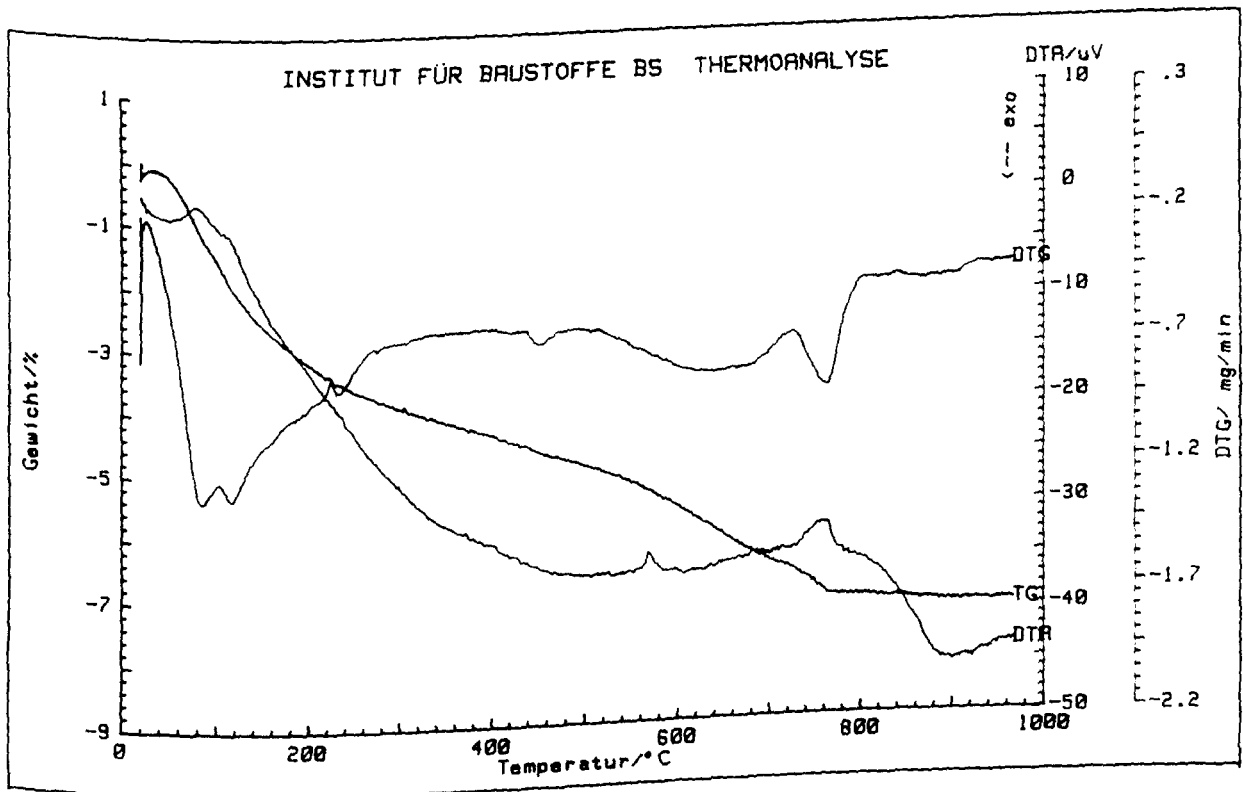
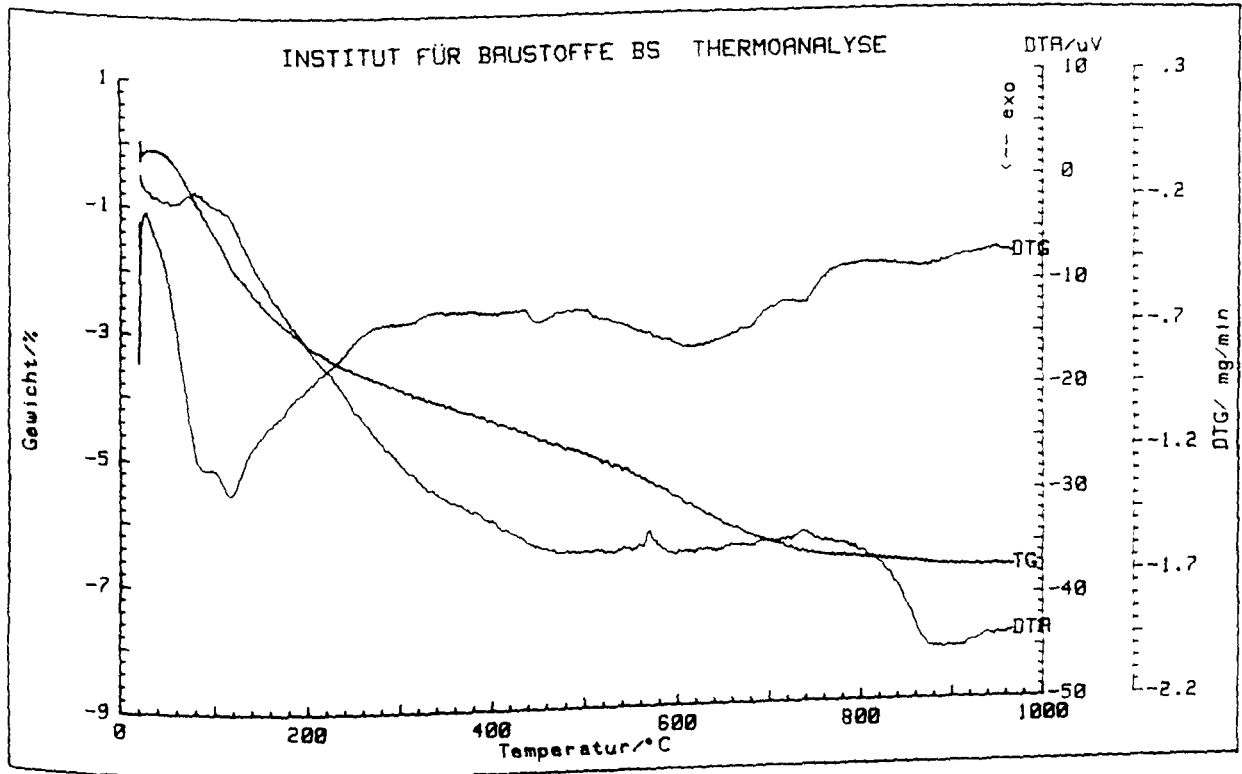


Abbildung 17: DTA/TG Aufnahme des Betons der 12 Monate in Trinkwasser eingelagert war (Tiefe 0-1 cm). Oben: Einlagerung bei 3,5°C. Unten: Einlagerung bei 35°C.

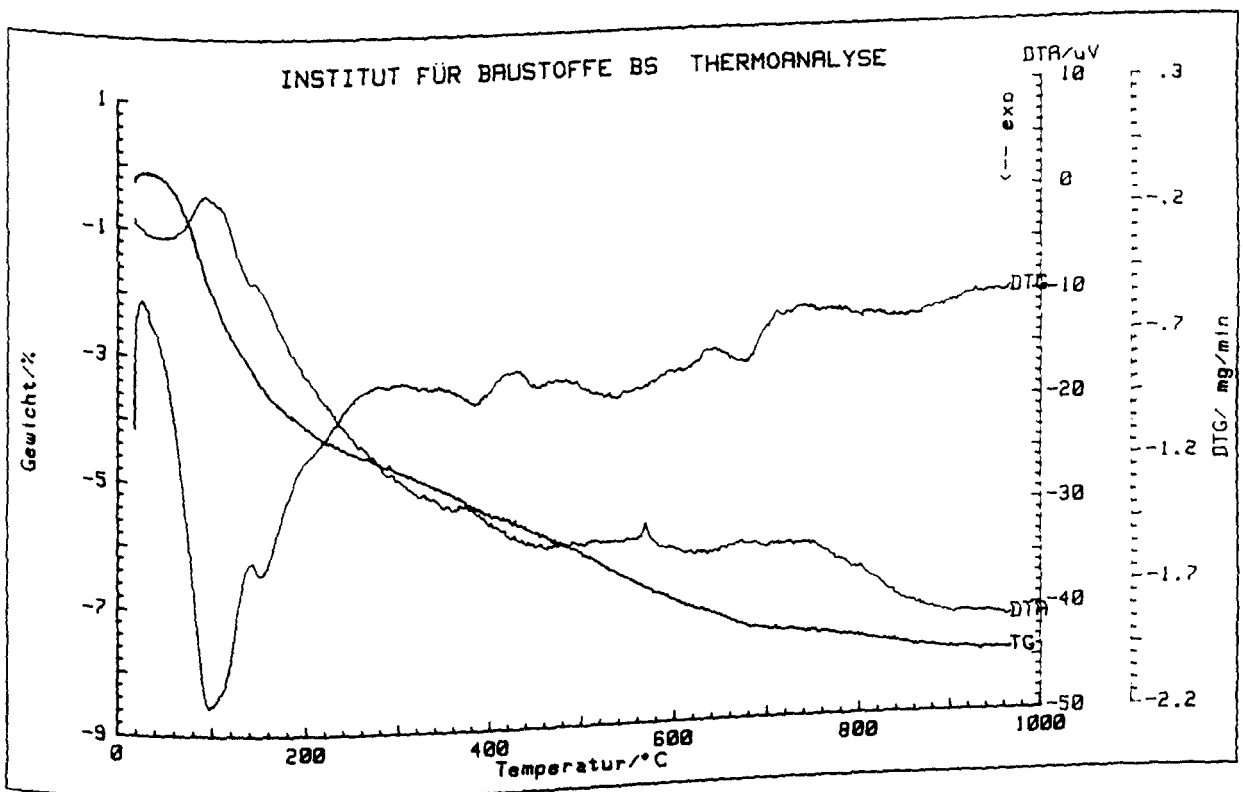
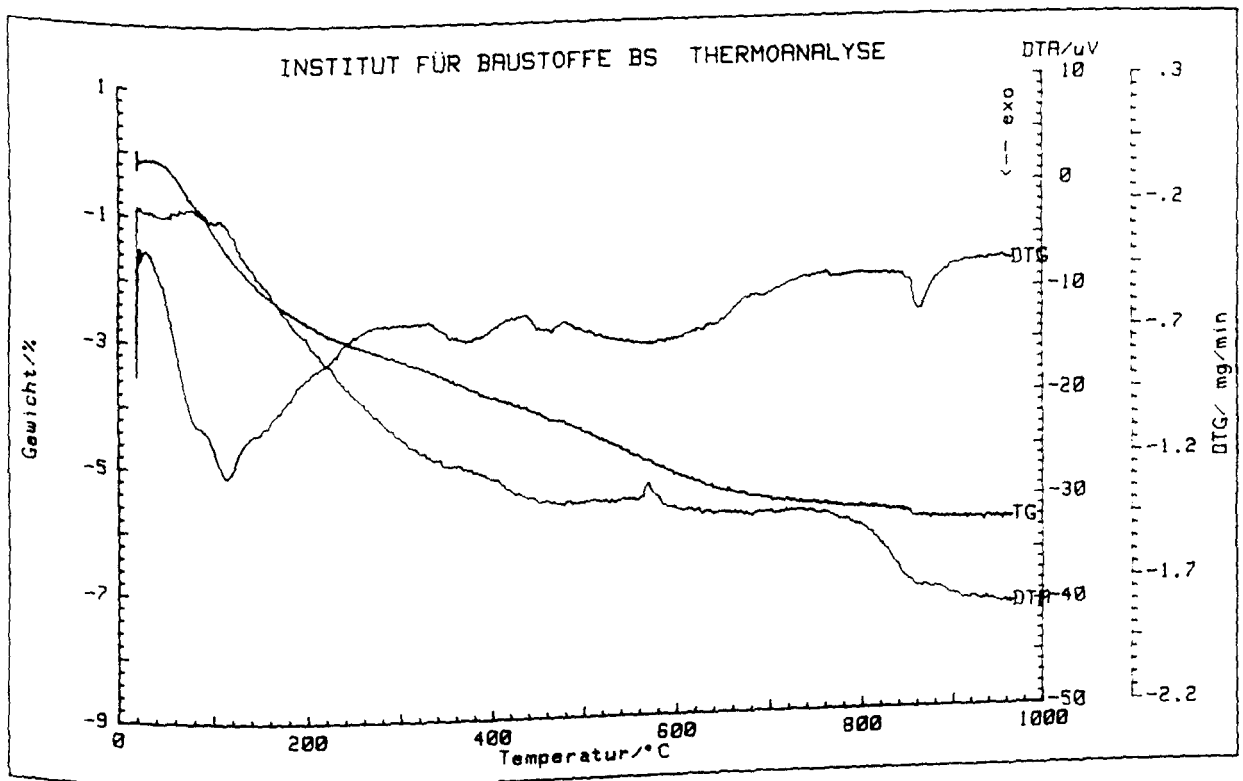


Abbildung 18: DTA/TG Aufnahme des Betons der 12 Monate in die Flüssigkeit LÖ2 eingelagert war (Tiefe 0-1 cm). Oben: Einlagerung bei 3,5°C. Unten: Einlagerung bei 35°C.

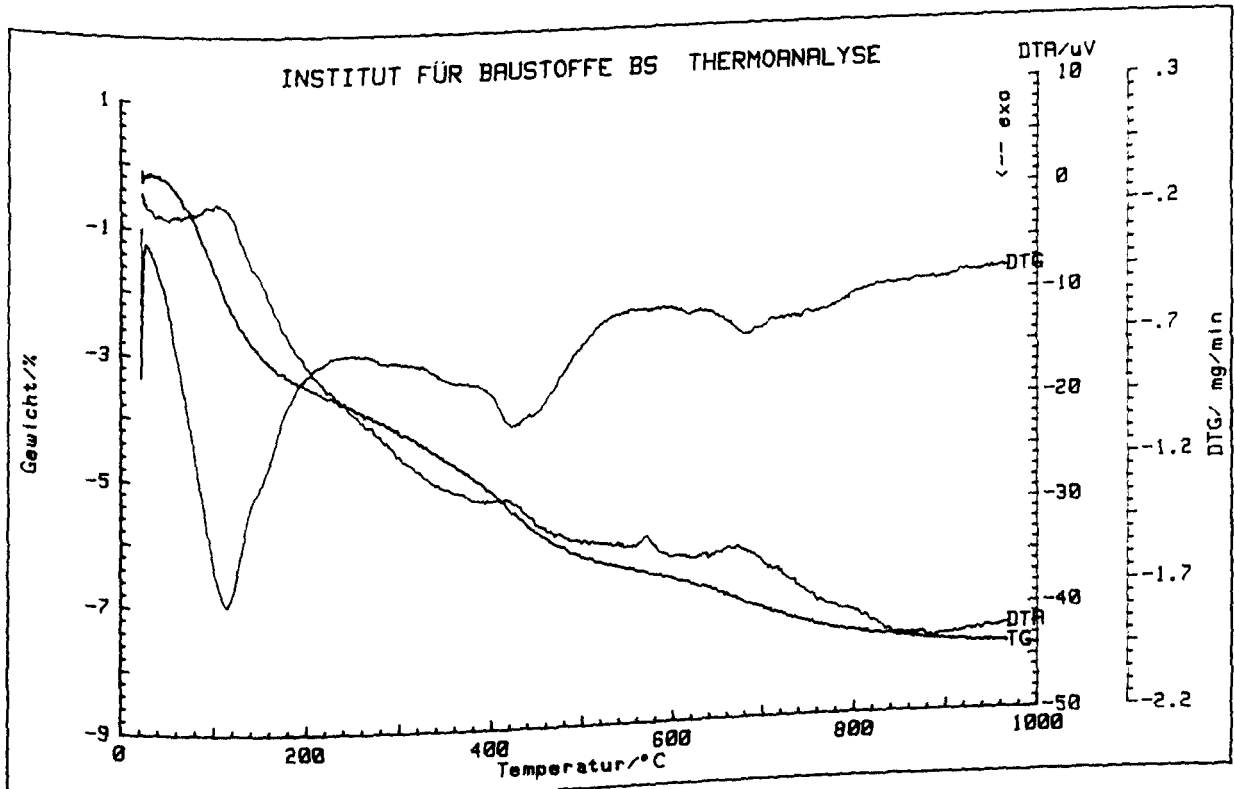
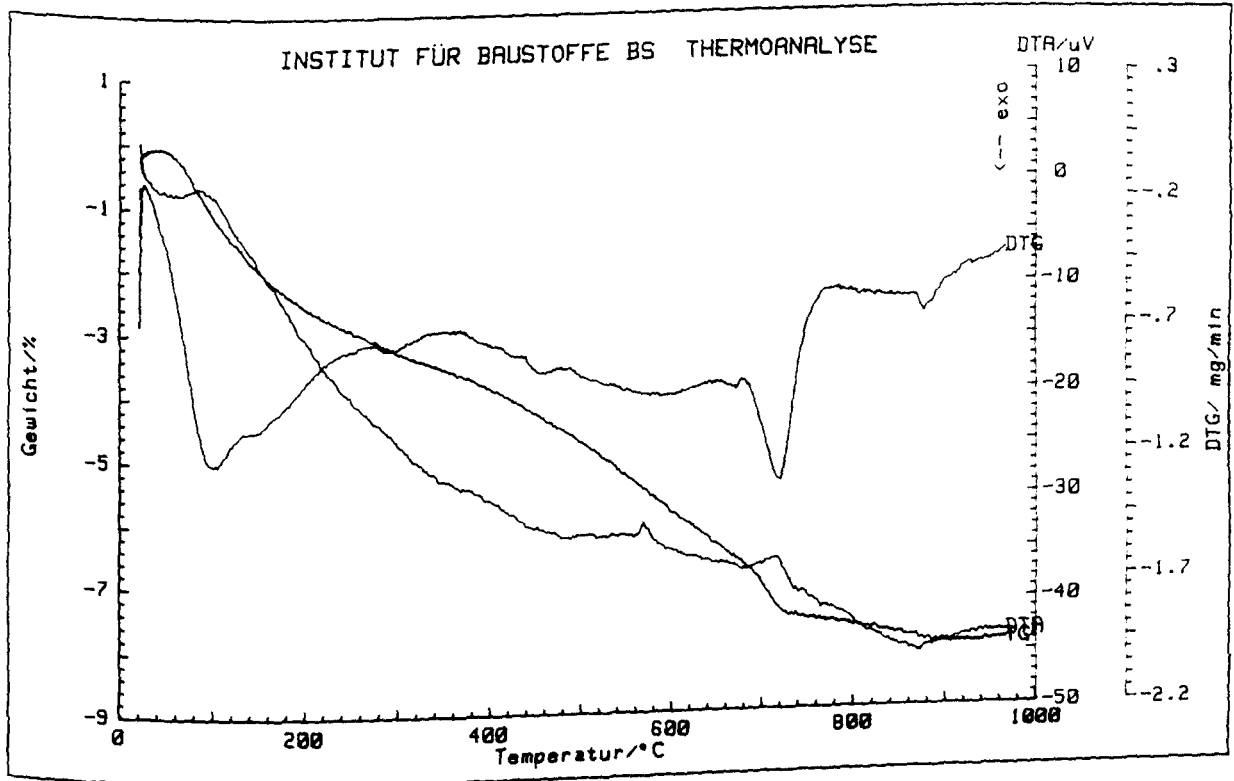


Abbildung 19: DTA/TG Aufnahme des Betons der 12 Monate in die Flüssigkeit LÖ4 eingelagert war (Tiefe 0-1 cm). Oben: Einlagerung bei 3,5°C. Unten: Einlagerung bei 35°C.

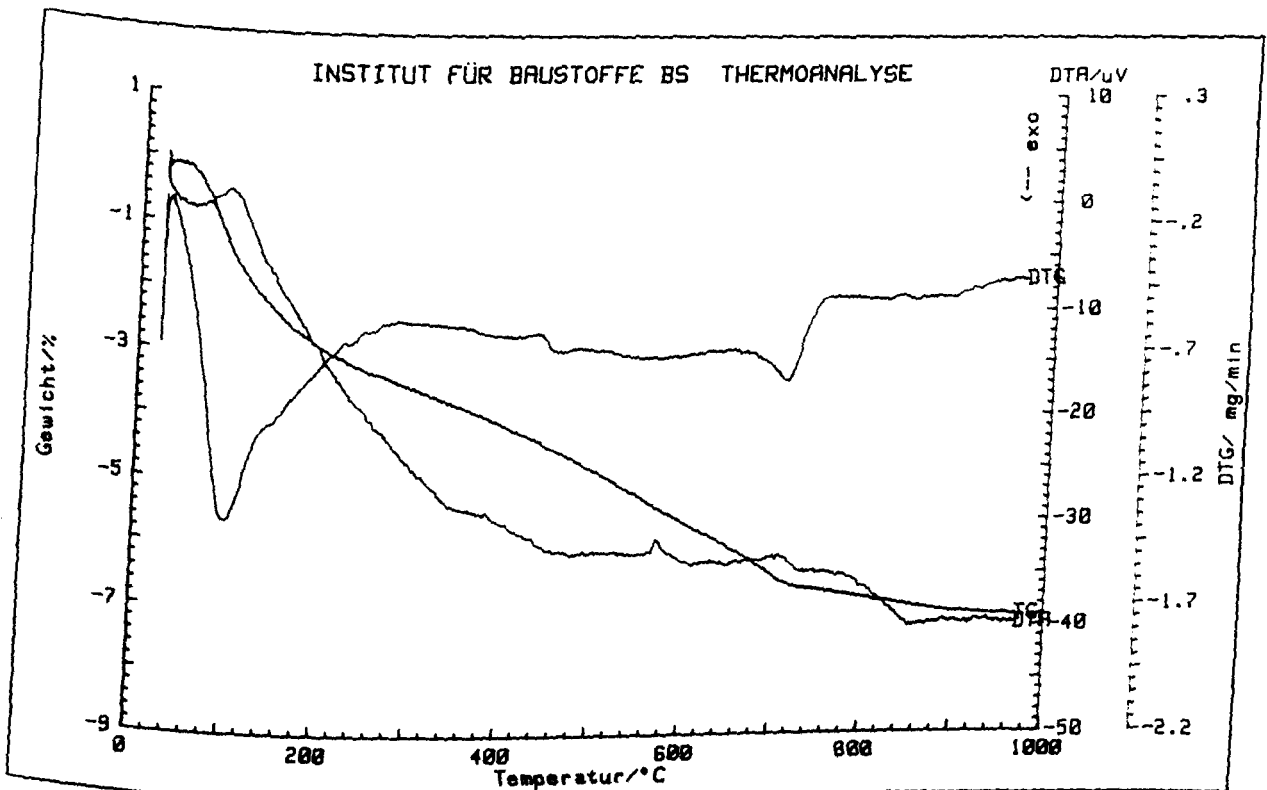
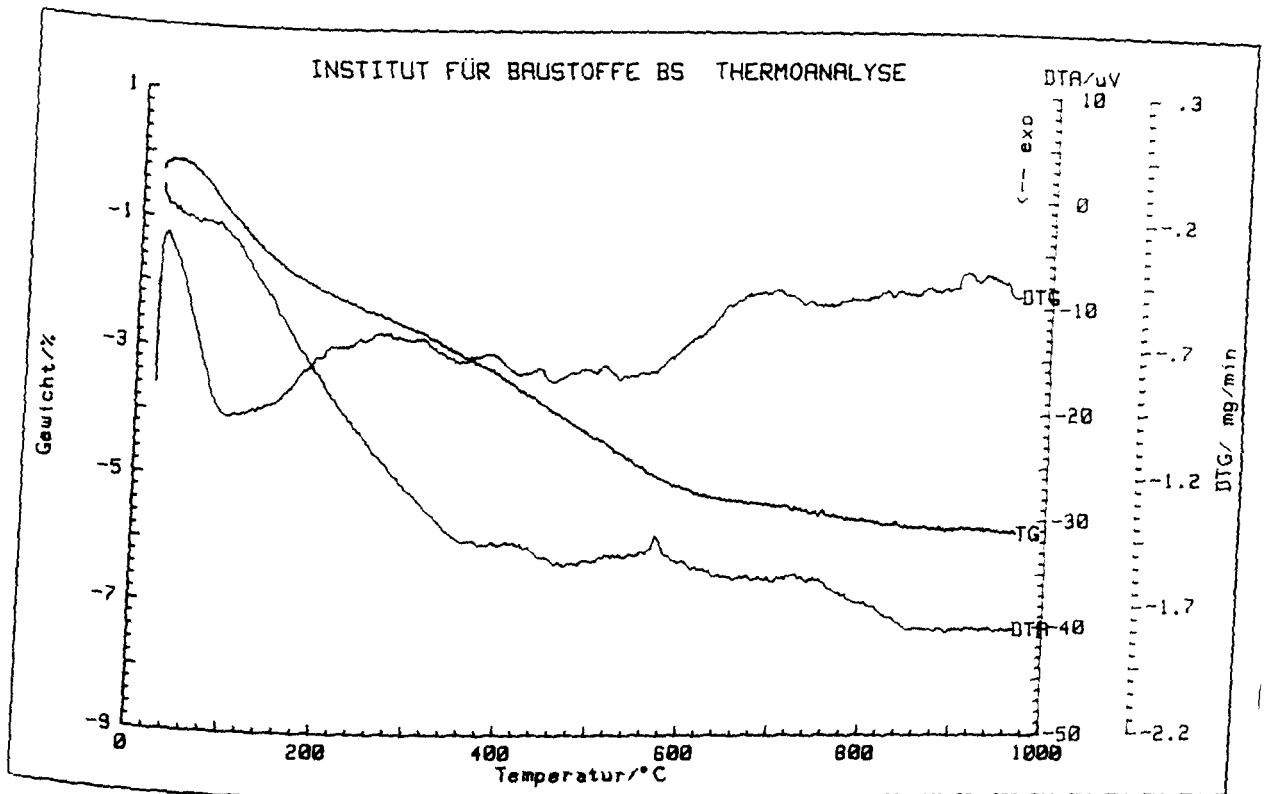


Abbildung 20: DTA/TG Aufnahme des Betons der 12 Monate mit der Flüssigkeit L4 unter 10 bar Druck beaufschlagt wurde (Tiefe 0-1 cm). Oben: Einlagerung bei 3,5°C. Unten: Einlagerung bei 35°C.

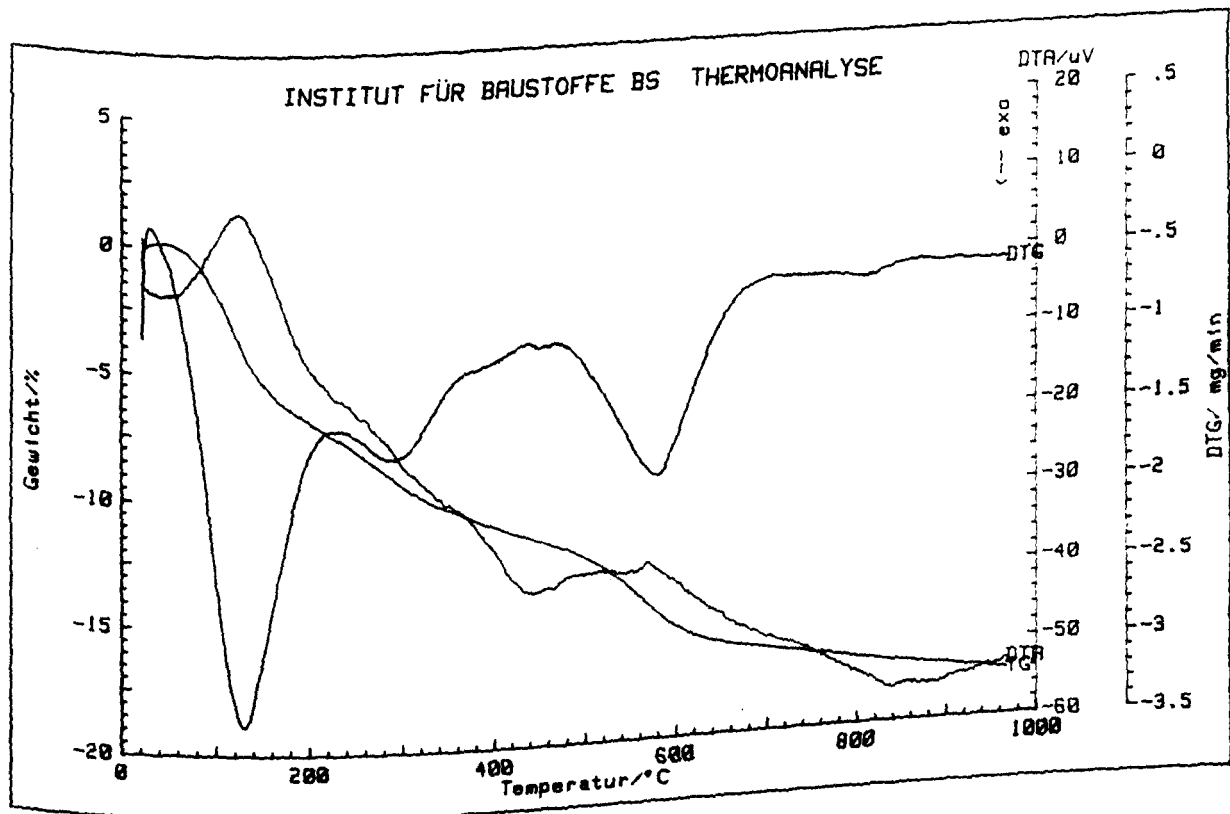


Abbildung 21: DTA/TG Aufnahme der Substanz, die sich auf der Oberfläche des Betons bildete, der bei 35°C 12 Monate mit der Flüssigkeit Lö4 beaufschlagt wurde.

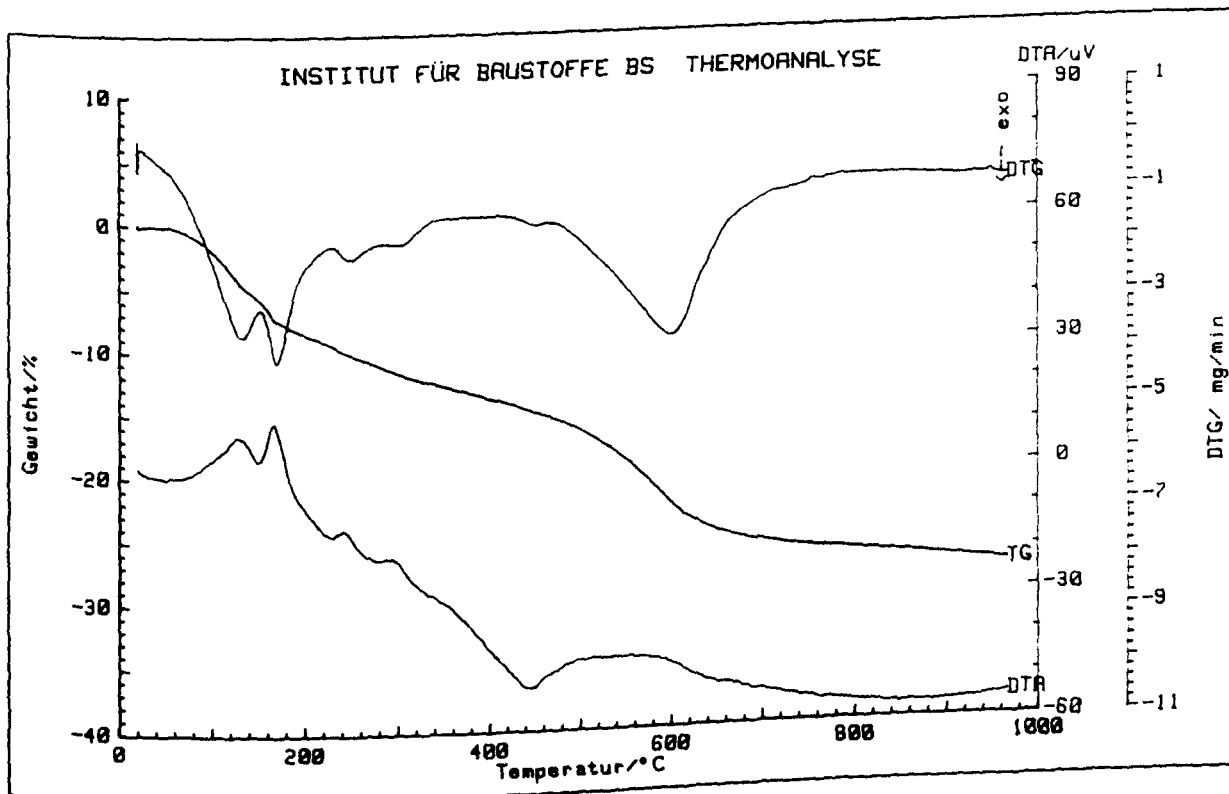
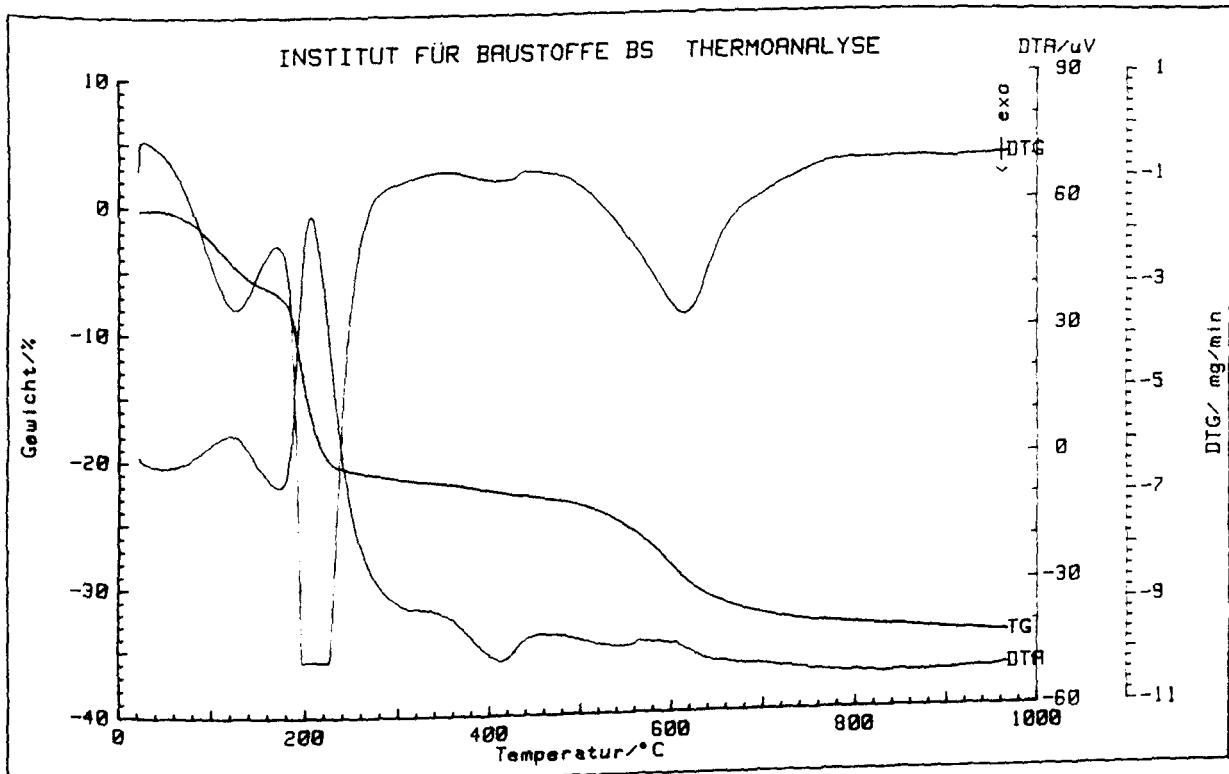


Abbildung 22: DTA/TG Aufnahme des Bodensatzes, der in der Flüssigkeit LÖ4 nach 12-monatiger Beaufschlagung vorlag. Oben: Beaufschlagung bei 3,5°C. Unten: Beaufschlagung bei 35°C.

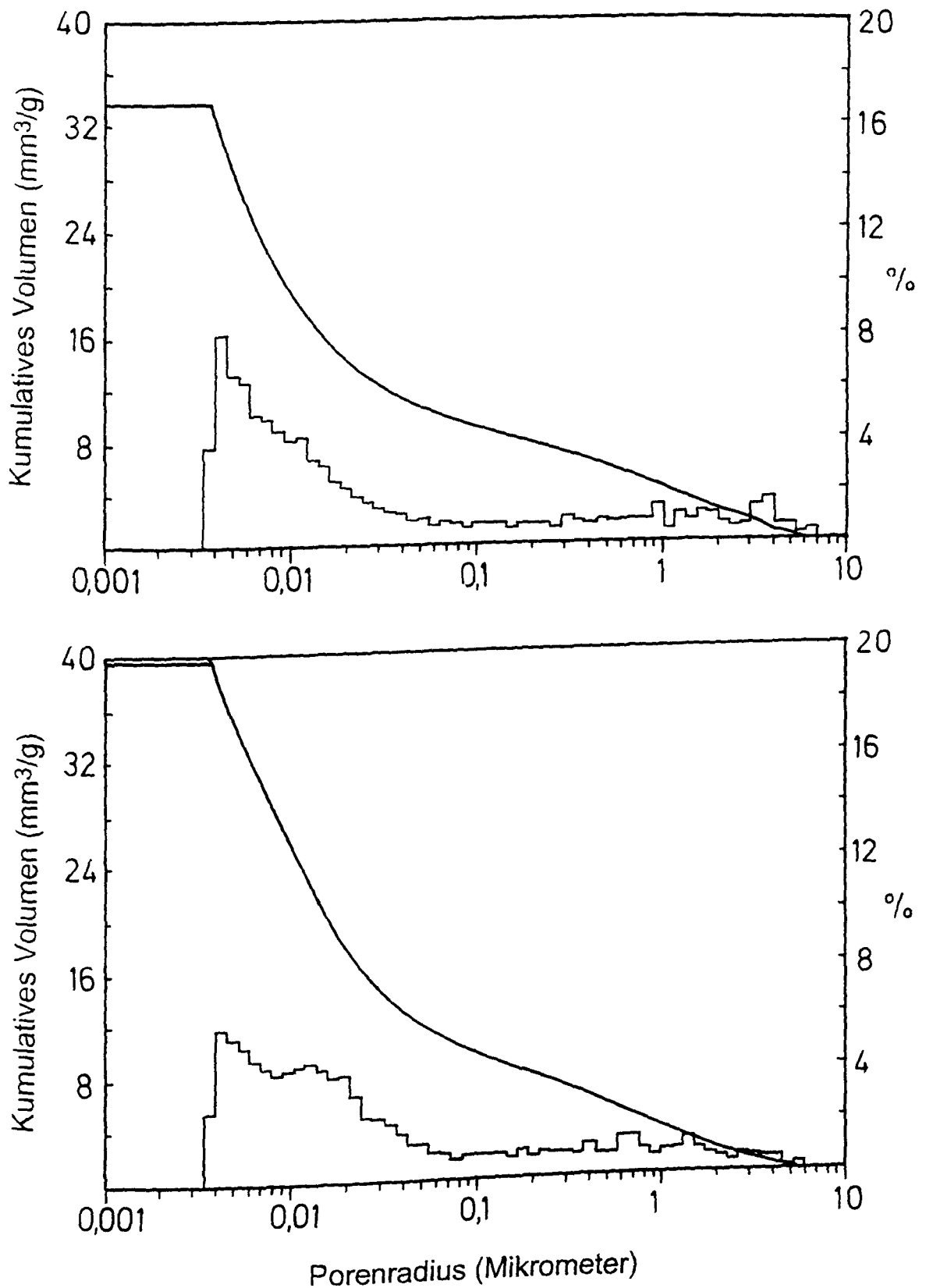


Abbildung 23: Porenradienverteilung des Versuchsbetons (0-1 cm Tiefe) nach 12-monatiger Beaufschlagung mit Trinkwasser, aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Einlagerung bei 35 °C. Unten: Einlagerung bei 3,5°C.

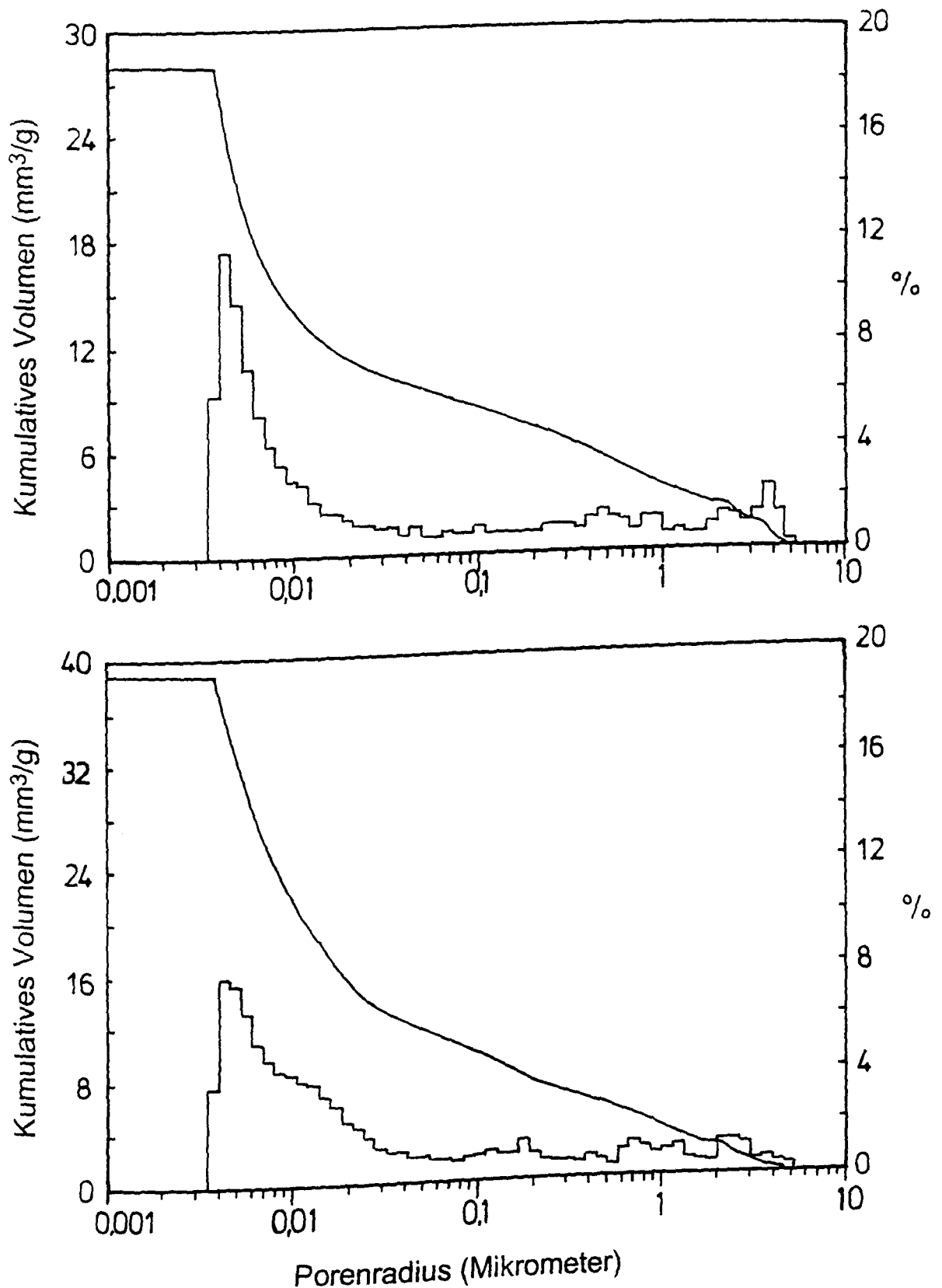


Abbildung 24: Porenradienverteilung des Versuchsbetons (0-1 cm Tiefe) nach 12-monatiger Beaufschlagung mit der Flüssigkeit Lö2, aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Einlagerung bei 35 °C. Unten: Einlagerung bei 3,5 °C.

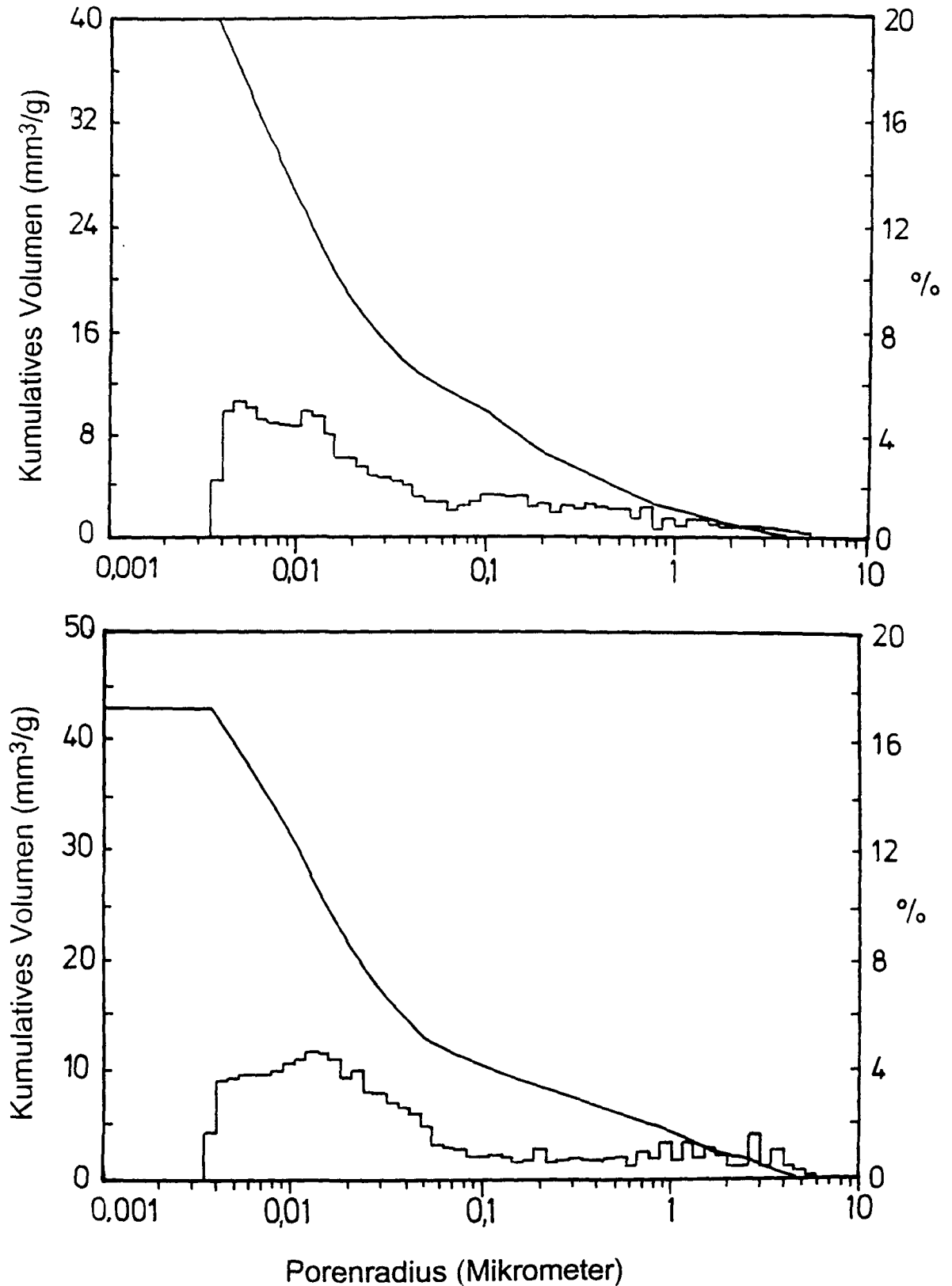


Abbildung 25: Porenradienverteilung des Versuchsbetons (0-1 cm Tiefe) nach 12-monatiger Beaufschlagung mit der Flüssigkeit Lö4, aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Einlagerung bei 35 °C. Unten: Einlagerung bei 3,5°C.